Міністерство освіти і науки України
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Українське фізичне товариство
Академія вищої школи України
Slovak University of Technology in Bratislava, Slovak Republic
VILNIUS TECH (Vilnius Gediminas Technical University), Lithuania
Atatürk University, Republic of Turkey
Georgian Technical University, Georgia

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В БУДІВЕЛЬНІЙ ІНДУСТРІЇ

Збірник праць

VIII Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених

Одеса, 9-10 квітня 2026

The Eighth International Scientific and Practical Conference of Higher Education Applicants and Young Scientists

PHYSICAL FOUNDATIONS OF MODERN TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Proceedings

Odesa, April 9-10, 2026

Міністерство освіти і науки України
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Українське фізичне товариство
Академія вищої школи України
Slovak University of Technology in Bratislava, Slovak Republic
VILNIUS TECH (Vilnius Gediminas Technical University), Lithuania
Atatürk University, Republic of Turkey
Georgian Technical University, Georgia

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В БУДІВЕЛЬНІЙ ІНДУСТРІЇ

Збірник праць

VIII Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених

Одеса, 9-10 квітня 2026

The Eighth International Scientific and Practical Conference of Higher Education Applicants and Young Scientists

PHYSICAL FOUNDATIONS OF MODERN TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Proceedings

Odesa, April 9-10, 2026

УДК 53 : 69
Ф 48

Рекомендовано до друку Вченою Радою
Одеської державної академії будівництва та архітектури
(протокол № 7 від 15 травня 2026 р.)

Ф 48 Фізичні основи сучасних технологій в будівельній індустрії: збірник праць VIII Міжнар. наук.-практ. конф. здобув. вищ. осв. та молод. вч. – Одеса: ОДАБА, 2026. – 244 с. **ISBN 978-617-8365-82-0**

Редакційна колегія:
Писаренко О.М., к.ф.-м.н., доц.; **Загинайло І.В.**, к.ф.-м.н., доц.;
Вілінська Л.М., к.ф.-м.н., доц.

VIII Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих вчених «Фізичні основи сучасних технологій в будівельній індустрії» покликана сприяти поліпшенню практичної і науково-теоретичної підготовки студентів та молодих вчених з фізики та інших технічних дисциплін. Основні наукові питання конференції присвячені: фізико-хімічним властивостям будівельних матеріалів, методам дослідження та розрахунку будівельних конструкцій, актуальним проблемами будівельної фізики, фізичним проблемам енергетики, засобам моніторингу навколишнього середовища, особливостям викладання фізики студентам ВНЗ технічного профілю, математичному моделюванню фізичних процесів в енергетиці, екології, матеріалознавстві і будівництві.

The Eighth Snternational Scientific and Practical Conference of Higher Education Applicants and Young Scientists "Physical foundations of modern technologies in the construction industry" aims to improve of the practical and scientific theoretical training of students and young scientists in physics and other technical subjects. The main scientific topics of the conference are devoted to: physical and chemical properties of building materials, methods of calculation and research of building structures, actual problems of building physics, physical problems of power engineering, environmental monitoring tools, teaching physics to engineering students, mathematical modeling of physical processes in energy, ecology, materials science and construction.

Відповідальні за випуск:
Вілінська Л.М., к.ф.-м.н., доц.; **Загинайло І.В.**, к.ф.-м.н., доц.

УДК **53 : 69**

Ф 48

ISBN 978-617-8365-82-0

© Одеська державна академія будівництва та архітектури, 2026

УДК 539.61:538.9

МОДЕЛІ КООПЕРАТИВНИХ ЯВИЩ В АДГЕЗІЇ

Дуков І. М. [1,a], **Колесников А. В.** [1,b,*]

[1] *Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна*

[a] *Студент;* [b]*Доцент кафедри хімії та екології*

[*] *Автор для листування: kolesnikov_himek@odaba.edu.ua*

Анотація. *Розвинуто кооперативну ґраткову модель адгезії на основі формалізму моделі Ізинґа. Адгезійна поверхня представляється ґраткою бінарних вузлів; взаємодія між ними породжує Hfpvth колективну поведінку з бістабільністю, фазовими переходами і гістерезисом. Введено параметр кооперативності* $\kappa = zJ / k_B T_{eff}$ *; при* $\kappa > 1$ *система виявляє два стійкі стани – повної адгезії і повної деадгезії. Встановлено відповідність із теорією катастроф (потенціал типу Ландау, нормальна форма «збірки»). Розглянуто два типи активних адгезійних складів із якісно різною динамікою кооперативності. Обговорено практичні наслідки для реставраційних матеріалів.*

Ключові слова: *адгезія, кооперативність, модель Ізинґа, бістабільність, активні адгезійні склади.*

MODELS OF COOPERATIVE PHENOMENA IN ADHESION

Dukov I. M.[1,a], **Kolesnykov A. V.**[1,b*]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

[a] *Master student,* [b]*Assoc. Prof. at the Dept. of Chemistry and Ecology*

[*] *Corresponding author: kolesnikov_himek@odaba.edu.ua*

Abstract. *A cooperative lattice model of adhesion is developed based on the Ising model formalism. The adhesive interface is represented as a lattice of binary sites; the interaction between these sites gives rise to collective behavior characterized by bistability, phase transitions, and hysteresis. A cooperativity parameter* $\kappa = zJ / k_B T_{eff}$ *is introduced; for* $\kappa > 1$*, the system exhibits two stable states: full adhesion and complete deadhesion. A correspondence with catastrophe theory is established (Landau-type potential, cusp normal form). Two types of active adhesive formulations with qualitatively different cooperativity dynamics are examined. Practical implications for restoration materials are discussed.*

Keywords: *adhesion, cooperativity, Ising model, bistability, active adhesive formulations.*

Актуальність дослідження. Класичний опис адгезії через усереднені характеристики – роботу адгезії та питому міцність – не пояснює низки якісних явищ: стрибкоподібного переходу між надійним зчепленням і відшаруванням при незначній зміні умов, острівкового руйнування контакту, гістерезису між адгезією і деадгезією, а також різкої залежності від тиску пресування для окремих складів. Ці ефекти зумовлені кооперативністю – взаємозалежністю станів сусідніх контактів, що формує колективну поведінку системи. Адгезійну систему доцільно розглядати як ансамбль взаємодіючих елементів, подібний до систем фізики конденсованого стану. Такий підхід дозволяє трактувати перехід між зчепленням і відшаруванням як фазовий, ввести параметр кооперативності та пояснити відмінності між системами, що потребують тиску при нанесенні, і «пасивними» адгезивами.

Стан проблеми. Кооперативні ефекти в адгезії досліджувалися у кількох контекстах. У біофізиці Белл [1] і Дембо з співавторами [2] показали, що рецепторно-лігандні зв'язки між клітинами є кооперативними через перерозподіл механічних напружень – формалізм, безпосередньо аналогічний моделі Ізинґа. Ліповскі і Зейферт [3] розвинули теорію відшарування мембран як фазового переходу з параметром порядку – щільністю адгезійних зв'язків. У механіці руйнування де Женн [4] показав нестійкість фронту деадгезії і острівковий характер відшарування, крім того підходи де Женна до опису адгезії полімерів та еластомерів базуються на використанні функціонала вільної енергії, який за своєю структурою є феноменологічно близьким до потенціалів типу Ландау. Томпсоном і Хантом до опису адгезійних систем була застосована теорія [5]. У будівельному матеріалознавстві систематичного підходу до кооперативної теорії адгезії досі не існує, хоча стрибкоподібний характер залежності адгезійної міцності від умов нанесення для ряду будівельних клеїв зафіксований емпірично [6].

Метою роботи є побудова і послідовний аналіз кооперативної моделі адгезії на основі ґраткового формалізму, аналогічного моделі Ізинґа; встановлення кількісних критеріїв кооперативної поведінки; опис двох якісно різних типів активних адгезійних складів у термінах динаміки кооперативності; демонстрація зв'язку з теорією катастроф і якісне виведення практичних рекомендацій щодо проєктування адгезійних систем у будівництві.

Отримані результати. Для побудови граткової моделі адгезії поверхня адгезійного контакту розбивається на елементарні ділянки розміром $a \times a$ ($a \sim 1$ –10 нм – характерний кластерний масштаб). Кожна ділянка – вузол ґратки –

перебуває в одному з двох станів: $\sigma_i = +1$ (зв'язок утворений) або $\sigma_i = -1$ (зв'язок відсутній). Гамільтоніан системи (1):

$$\mathcal{H} = -J \sum_{\langle i,j \rangle} \sigma_i \sigma_j - h_{eff} \sum_i \sigma_i \,, \tag{1}$$

де $J > 0$ – константа кооперативної взаємодії між сусідніми вузлами; $h_{eff} = h_{chem} + h_{press}$ – ефективне поле, що включає хімічну спорідненість адгезиву і субстрату (h_{chem}) та внесок від тиску пресування ($h_{press} \propto P_{press}$). Сума береться по парах найближчих сусідів; координаційне число $z = 4$ (квадратна ґратка) або $z = 6$ (гексагональна).

Фізичні механізми J: пружна взаємодія ($J^{(el)} \sim Ea^3\delta^2 / r_{ij}^3$, де E – модуль адгезиву, δ – деформація при утворенні зв'язку) є домінуючою для жорстких адгезивів; капілярна взаємодія через сполучену порову мережу – для пористих субстратів; хімічна кооперативність (автокаталіз реакцій тверднення) – для реакційних систем. Параметр T_{eff} у гамільтоніані є ефективною «температурою», що характеризує інтенсивність флуктуацій, які перешкоджають встановленню повного адгезійного контакту. Її внески: теплові флуктуації ($k_B T \approx 25$ кДж при 300 К, порівнянні з енергіями молекулярних зв'язків); механічні флуктуації (вібрації при нанесенні); топографічні варіації рельєфу поверхні (просторова нерівномірність h_{eff} на масштабі a). Операційне визначення: $k_B T_{eff}$ – енергія флуктуацій, що спричиняють мимовільні переходи між станами для ізольованого вузла.

Для якісного аналізу, достатнього для встановлення топології фазової діаграми і кооперативного характеру переходів, застосовується середньопольове (молекулярно-польове) наближення. Його суть полягає у заміні точного поля від z сусідів кожного вузла на ефективне середнє поле (2):

$$h_{mf} = zJ\langle\sigma\rangle \equiv zJm, \tag{2}$$

де $m = \langle\sigma_i\rangle$ – середнє значення спінової змінної (параметр порядку), однаковий для всіх вузлів у однорідній системі.

Тоді гамільтоніан факторизується по вузлах (3):

$$\mathcal{H}MF = -\sum_i (zJm + heff)\sigma_i + \frac{NzJm^2}{2}. \tag{3}$$

Статистична сума одного вузла у середньому полі дорівнює(4):

$$Z_1 = \sum_{\sigma=\pm1} \exp\left[\frac{(zJm + h_{eff})\sigma}{k_B T_{eff}}\right] = 2\cosh\left(\frac{zJm + h_{eff}}{k_B T_{eff}}\right). \quad (4)$$

Середнє значення $\langle\sigma\rangle$ повинно дорівнювати m, що дає рівняння самоузгодженості (5):

$$m = \tanh\left(\frac{zJm + h_{eff}}{k_B T_{eff}}\right). \quad (5)$$

Це є центральним рівнянням ґраткової теорії адгезії. Його структура повністю аналогічна рівнянню Кюрі–Вейса у теорії феромагнетизму. Параметр m є параметром порядку: $m = +1$ відповідає стану повної адгезії (всі вузли у стані $+1$), $m = -1$ – стану повної деадгезії (всі вузли у стані -1), $m = 0$ – невпорядкованому стану. Щільність адгезійних зв'язків виражається через m як (6):

$$\rho_{bond} = \frac{1+m}{2} \in [0,1]. \quad (6)$$

Розглянемо рівняння самоузгодженості у загальному вигляді при $h_{eff} \neq 0$ (7):

$$m = \tanh(\kappa m + \tilde{h}), \quad (7)$$

де $\tilde{h} = h_{eff} / (k_B T_{eff})$ – безрозмірне ефективне поле.

Геометричний метод аналізу: розв'язки відповідають перетинам прямої $y = m$ і кривої $y = \tanh(\kappa m + \tilde{h})$.

Випадок $\tilde{h} = 0$ (симетрична система). При $\kappa < 1$ нахил кривої $\tanh$ у початку координат, що дорівнює κ, менший за 1, і крива перетинає пряму $y = m$ лише в точці $m = 0$. Єдиним стійким розв'язком є $m = 0$ – невпорядкований стан без переважаючої адгезії чи деадгезії. При $\kappa = 1$ відбувається біфуркація: нахил $\tanh$ у початку дорівнює 1, і при подальшому зростанні κ з'являються два нові розв'язки $m = \pm m_0(\kappa)$. Аналітично неподалік біфуркаційної точки при $\kappa = 1 + \epsilon$, $\epsilon \ll 1$маємо (8):

$$m_0 \approx \pm\sqrt{3\epsilon} = \pm\sqrt{3(\kappa - 1)}. \quad (8)$$

При $\kappa > 1$ існують три розв'язки: $m = +m_0$ (повна адгезія), $m = 0$ (нестійкий стан), $m = -m_0$ (повна деадгезія). Стійкість розв'язків визначається

другою варіацією вільної енергії: розв'язки $m = \pm m_0$ є стійкими (мінімуми вільної енергії), $m = 0$ – нестійким (максимум або сідлова точка). Вільна енергія системи дорівнює (9):

$$F(m) = \frac{Nk_B T_{eff}}{2}\left[\kappa m^2 - \ln 2\cosh(\kappa m + \tilde{h}) + \text{const}\right]. \qquad (9)$$

Випадок $\tilde{h} \neq 0$ (асиметрична система). Ненульове поле $\tilde{h}$ порушує симетрію між станами $+1$ і -1. При $\kappa > \kappa_c$ і $|\tilde{h}| < \tilde{h}_c(\kappa)$ (де $\tilde{h}_c(\kappa)$ – критичне поле) система все ще може мати два стійкі стани, але з нерівними глибинами потенційних ям. При $|\tilde{h}| > \tilde{h}_c(\kappa)$ одна з ям зникає і залишається єдиний стійкий стан – той, що відповідає напрямку поля. Критичне поле визначається (10):

$$\tilde{h}_c(\kappa) = \frac{2}{\sqrt{3}}\left[1 - \frac{1}{\kappa}\right]^{3/2}\kappa \quad (\textit{при}\ \kappa \gg 1:\quad \tilde{h}_c \approx \kappa - \frac{3}{2}\kappa^{1/3}) \qquad (10)$$

Лінія $\tilde{h}_c(\kappa)$ на фазовій діаграмі у координатах $(\kappa, \tilde{h})$ є лінією першого роду фазового переходу між станами з перевагою адгезії і деадгезії. При перетині цієї лінії параметр порядку m зазнає стрибка – це і є аналог переходу «феромагнетик–парамагнетик» першого роду у зовнішньому полі.

Повна фазова діаграма на площині $(\kappa, \tilde{h})$ (рис. 1) містить: область $\kappa < 1$ – некооперативна фаза, єдиний стійкий стан для будь-якого $\tilde{h}$; область $\kappa > 1$, $|\tilde{h}| < \tilde{h}_c$ – бістабільна фаза, два стійкі стани; область $\kappa > 1$, $|\tilde{h}| > \tilde{h}_c$ – монофазна (адгезія або деадгезія залежно від знаку $\tilde{h}$); критична точка $\kappa = 1$, $\tilde{h} = 0$ – точка фазового переходу другого роду.

Константа J у гамільтоніані моделі не є феноменологічним параметром «з повітря» – вона обумовлена конкретними фізичними механізмами взаємодії між сусідніми вузлами. Розглянемо ці механізми послідовно, від найбільш важливих до другорядних.

Пружна взаємодія. Якщо вузол i перебуває у стані «приклеєний» ($\sigma_i = +1$), він деформований, а напруження частково передається сусідньому вузлу j. Це підвищує ймовірність переходу j у стан $+1$, тобто $J^{(el)} > 0$ (феромагнітна взаємодія). Оцінка: $J^{(el)} \approx \frac{Ea^3\delta^2}{r_{ij}^3}$ де E – модуль пружності, δ – деформація,

r_{ij} – відстань між вузлами. Для $E \sim 1$–10 ГПа, $a \sim 5$ нм, $\delta \sim 0.1$ нм, $r_{ij} \sim a$: $J^{(el)} \sim 10^{-20}$ Дж, що є суттєвим на мезорівні.

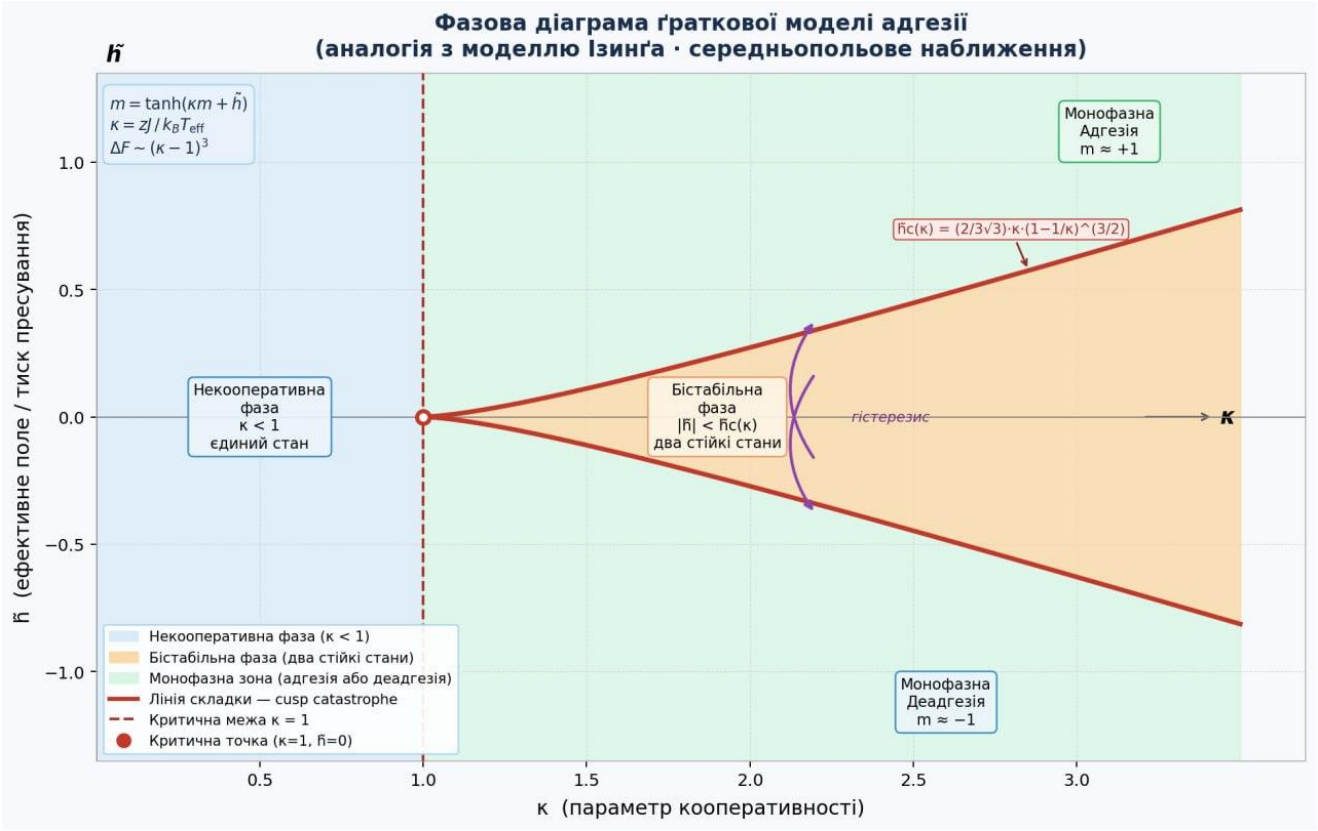


Рис.1. Фазова діаграма кооперативного процесу в адгезії

Капілярна взаємодія. Затікання адгезиву в пору i $(\sigma_i = +1)$ змінює капілярний тиск і впливає на сусідню пору j. Для зв'язаних пор взаємодія феромагнітна, для ізольованих – відсутня. Важлива для дрібнопористих систем.

Хімічна кооперативність. У реакційних адгезивах утворення зв'язку в вузлі i змінює локальну кінетику в j. При автокаталізі $J^{(chem)} > 0$, при виснаженні реагентів – $J^{(chem)} < 0$. Зазвичай: феромагнітна на малих масштабах, можлива антиферомагнітна на великих.

Електростатична взаємодія. Утворення зв'язку в i змінює потенціал подвійного шару біля j; взаємодія спадає як $\sim e^{-\kappa_D r_{ij}}$ і суттєва при малій іонній силі. Сумарна взаємодія: $J = J^{(el)} + J^{(cap)} + J^{(chem)} + J^{(el-st)}$

Для будівельних матеріалів визначальними є пружний і капілярний механізми.

Ґраткова модель, побудована у попередньому розділі, дає дискретний опис адгезійного контакту. Для опису стаціонарних станів і динаміки переходів між

ними зручно перейти до неперервного опису у рамках теорії Ландау фазових переходів. Розвинемо вільну енергію адгезійної системи як функцію неперервного параметра порядку m у ряд Тейлора (при $\tilde{h}=0$ і $m \ll 1$) (11):

$$F(m) = F_0 + \frac{a}{2}m^2 + \frac{b}{4}m^4 + \frac{c}{6}m^6 + \ldots - h_{eff}\,m\ , \qquad (11)$$

де коефіцієнти $a = k_B T_{eff}(1-\kappa),\ \ b = k_B T_{eff}\,\kappa^3/3 > 0,\ \ c > 0$. При $\kappa < 1$ коефіцієнт $a > 0$ і потенціал $F(m)$ має єдиний мінімум при $m = 0$ – некооперативний стан. При $\kappa > 1$ коефіцієнт $a < 0$ і потенціал набуває форми «мексиканського капелюха» з двома мінімумами при $m = \pm m_0 \approx \pm\sqrt{3(\kappa-1)/\kappa^3}$ – бістабільний стан. Ненульове поле h_{eff} нахиляє потенціал, роблячи одну яму глибшою за іншу.

Це є точна відповідність потенціалу Ландау для фазового переходу другого роду (при $\kappa = 1,\ h_{eff} = 0$) і першого роду (при $\kappa > 1$ і $h_{eff} = h_c$). Внесення члена m^6 або m^8 необхідне для стабілізації потенціалу при великих m у ряді випадків, але якісна картина визначається вже членами m^2 і m^4.

Теорія катастроф Тома класифікує якісні зміни у структурі критичних точок потенціальних функцій при варіації параметрів. Для потенціалу виду $\Phi(m;\alpha,\beta) = m^4 + \alpha m^2 + \beta m$ (нормальна форма «збірки», cusp catastrophe) критичні точки (рівняння $\partial\Phi/\partial m = 0$) утворюють на площині параметрів (α,β) поверхню, що має особливість у вигляді «складки», або «збірки». Порівнюючи з потенціалом Ландау (12):

$$F(m) = \frac{b}{4}m^4 + \frac{a}{2}m^2 - h_{eff}\,m, \qquad (12)$$

ідентифікуємо: $\alpha \leftrightarrow a = k_B T_{eff}(1-\kappa),\ \beta \leftrightarrow -h_{eff}$.

Параметри керування: α змінюється при зміні κ (тобто при зміні ефективної температури або константи кооперативної взаємодії); $\beta = -h_{eff}$ змінюється при зміні зовнішнього механічного зусилля.

На площині (α,β) лінія складки визначається умовами $\partial F/\partial m = 0$ і $\partial^2 F/\partial m^2 = 0$ одночасно (13):

$$bm^3 + am - h_{eff} = 0, \quad 3bm^2 + a = 0 \qquad (13):$$

Виключаючи m, отримуємо рівняння лінії складки (14):

$$4a^3 + 27b^2 h_{eff}^2 = 0 \Rightarrow h_c = \pm\frac{2}{3\sqrt{3}}\left(\frac{-a^3}{b^3}\right)^{1/2} = \pm\frac{2}{3\sqrt{3}}\left(\frac{k_B T_{eff}(\kappa-1)}{b}\right)^{3/2} \quad (14)$$

При перетині лінії складки (при зміні h_{eff} при фіксованому $\kappa > 1$) параметр порядку m зазнає стрибка – це і є катастрофічний (не плавний) перехід між станами адгезії і деадгезії. Зовнішнє механічне зусилля є тим самим параметром β, що переводить систему через лінію складки.

Внутрішня область збірки (при $4a^3 + 27b^2\beta^2 < 0$, тобто при $\kappa > 1$ і $|h_{eff}| < h_c$) відповідає бістабільному стану – два стійкі мінімуми розділені потенціальним бар'єром висотою (15):

$$\Delta F = F(m_{unstable}) - F(m_{stable}) = \frac{|a|^3}{12b^2} k_B T_{eff}^{-1} \sim (\kappa-1)^3 \quad (15)$$

Висота бар'єру зростає як $(\kappa-1)^3$ і стає значною вже при помірній надкритичності $\kappa - 1 \sim 0.1$–0.3.

Зовнішнє механічне зусилля (тиск пресування при нанесенні адгезиву) відіграє в адгезійній системі роль, аналогічну ролі зовнішнього магнітного поля в моделі Ізинґа. Воно входить у гамільтоніан як $-h\sum_i \sigma_i$, де $h \propto P_{press}$ – тиск пресування. При $P_{press} > 0$ поле $h > 0$ надає перевагу стану «приклеєно» ($\sigma_i = +1$) над станом «відірвано» ($\sigma_i = -1$), тобто зміщує рівновагу у бік адгезії.

Якщо система знаходиться у бістабільній фазі ($\kappa > 1$), то при $P_{press} = 0$ обидва стани (повна адгезія і повна деадгезія) є рівноймовірними. Невелике зовнішнє поле $h > 0$ нахиляє потенціал, але не переводить систему зі стану деадгезії у стан адгезії, якщо бар'єр $\Delta F \gg k_B T_{eff}$. Для переходу необхідно поле, що перевищує критичне: $h > h_c$. Це є точним аналогом переключення намагніченості феромагнетику зовнішнім полем – процесу, що також вимагає подолання бар'єру і є гістерезисним.

Фізично: недостатнє пресування при нанесенні адгезиву у системі з високою кооперативністю ($\kappa \gg 1$) і великим бар'єром не переводить систему у стан повної адгезії – вона залишається у стані деадгезії або у нестійкому проміжному стані. Достатнє пресування ($h > h_c$) переводить систему через максимум потенціалу у стан повної адгезії, де вона залишається навіть після зняття зусилля (оскільки стан $m = +m_0$ є стійким мінімумом). Це пояснює добре відоме

емпіричне правило: деякі клейові системи вимагають значного пресування і часу витримки під тиском, тоді як інші адгезують навіть при мінімальному контакті.

Відповідно до наведеного теоретичного погляду можна запроаонувати класифікацію адгезійних складів залежно від характеру кооперативних властивостей:

а) Склади типу I: висока початкова кооперативність. Склади типу I характеризуються $\kappa \gg 1$ вже у момент нанесення (наприклад, термоплавкі клеї з мезогенними блоками, системи з кооперативним «зіпер»-механізмом зв'язування). Потенціал $F(m)$ є двоямним від початку; для переходу зі стану деадгезії ($m = -m_0$) у стан адгезії ($m = +m_0$) необхідне зусилля, що перевищує критичне (16):

$$h > h_c \sim (\kappa - 1)^{3/2} k_B T_{eff} / a^2 . \tag{16}$$

Відповідний критичний тиск пресування: $P_c = h_c / (\mu_0 a^2)$. Залежність $P_c \sim (\kappa - 1)^{3/2}$ показує, що навіть помірне перевищення $\kappa > 1$ різко підвищує необхідне пресування. Після переходу система замикається у стані $m = +m_0$; гістерезис максимальний: для деадгезії потрібне зусилля тієї ж величини h_c. Для крихких субстратів (ракушняк із когезійною міцністю 1–3 МПа) критичний тиск пресування може перевищувати міцність основи – практичне обмеження складів типу I.

б) Склади типу II: кооперативність, що розвивається при твердненні. Склади типу II (епоксидні системи, цементні і вапняні клеї, анаеробні герметики) характеризуються зростанням $\kappa(t)$ у часі в міру тверднення (17):

$$\kappa(t) = \kappa_\infty \left(1 - e^{-t/\tau}\right), \tag{17}$$

де $\kappa_\infty > 1$ – кінцеве значення після повного тверднення, τ – час тверднення. У момент нанесення $(t = 0)$ $\kappa_0 \approx 0$ – система некооперативна; при $t = t^* = \tau \ln[\kappa_\infty / (\kappa_\infty - 1)]$ – перетин критичної лінії $\kappa = 1$.

Малий початковий тиск встановлює ненульову «затравку» (18):

$$m_0(t = 0) \approx \tilde{h} = \frac{\mu_0 P_{press} a^2}{k_B T_{eff}} \ll 1. \tag{18}$$

При $\kappa(t) \to 1$ параметр порядку зростає за законом, що відповідає критичній поведінці. При $\kappa > 1$ система переходить у стан $m \approx +m_0(\kappa_\infty) \approx 1$ –

повна адгезія. Умова надійного замикання: до моменту зняття тиску $t_{release}$ параметр порядку має перевищити нестійкий максимум (19):

$$m(t_{release}) > m_{unstable}(t_{release}) = \sqrt{-a(t_{release})/b}\,, \tag{19}$$

що дає мінімальний час витримки під тиском (20):

$$t_{release} > \tau \ln\left(\frac{\kappa_\infty}{\kappa_\infty - \kappa^*}\right), \tag{20}$$

де $\kappa^* > 1$ – значення κ, при якому умова замикання виконана. Для типових $\kappa_\infty = 2{-}3$ час витримки становить $0.3 - 0.7\tau$ – значно менше повного часу тверднення.

Таким чином, для складів типу II достатньо малого початкового тиску при нанесенні; подальший розвиток кооперативності при твердненні самостійно переводить і замикає систему у стані повної адгезії.

Для гладкої поверхні взаємодія між вузлами є максимально однорідною: $z_{eff} = z$, $\kappa_{smooth} = zJ/(k_B T_{eff})$ – максимальне для даної хімічної системи. Кооперативні ефекти (стрибки, гістерезис, острівкове руйнування) найяскравіші. Для шорсткої поверхні з кореляційною довжиною нерівностей $\xi \gg a$ ефективне координаційне число зменшується (21):

$$z_{eff}(\xi) \approx z\left(\frac{a}{\xi}\right)^2, \quad \kappa_{rough} \approx \kappa_{smooth}\left(\frac{a}{\xi}\right)^2 \ll \kappa_{smooth}. \tag{21}$$

При великій шорсткості $\kappa_{rough} < 1$, і система є некооперативною попри хімічну активність пари. Для пористих матеріалів (ракушняк, пінобетон) фізико-хімічна кооперативність послаблена і адгезія є переважно адитивною з домінуванням механічного анкерного механізму. Підвищення механічної адгезії і послаблення кооперативної є двома взаємопов'язаними наслідками збільшення шорсткості.

Серед багатьох фізичних наслідків дії кооперативних механізмів при адгезії розглянемо два – острівкове руйнування і гістерезис адгезії.

Острівкове руйнування є аналогом нуклеації нової фази. Зародок деадгезії розміром $R > R_c \sim \sigma_{interface}/|\Delta F/V|$ зростає спонтанно. При $h_{ext} \to h_c$ критичний розмір $R_c \to \infty$ і руйнування відбувається через спінодальний розпад (одночасне по всій поверхні); далеко від h_c – множинна нуклеація острівців деадгезії.

Гістерезис адгезії є прямим наслідком бістабільності. Ширина гістерезисної петлі (22):

$$\Delta h = h_c^{(-)} - h_c^{(+)} \approx h_c(\kappa) \cdot \tilde{h}_{chem} \qquad (22)$$

зростає з κ і хімічною спорідненістю. Вимірювання Δh у циклічних механічних тестах є прямим методом оцінки κ.

Висновки. Побудовано ґраткову модель адгезії на основі формалізму моделі Ізинґа. Параметр кооперативності $\kappa = zJ / k_B T_{eff}$ є кількісним критерієм якісної зміни поведінки: при $\kappa > 1$ система є бістабільною з потенційним бар'єром $\Delta F \sim (\kappa - 1)^3$. Встановлено відповідність із теорією катастроф (cusp catastrophe); зовнішнє механічне зусилля є аналогом поля, що переводить систему через лінію складки з катастрофічним стрибком параметра порядку. Розрізнено два типи активних складів: склади типу I вимагають значного пресування і не придатні для крихких пористих субстратів; склади типу II ($\kappa(t)$ зростає при твердненні) є оптимальними – малий початковий тиск і кооперативне самозамикання. Кооперативність послаблюється зі збільшенням шорсткості ($\kappa \sim (a / \xi)^2$) і є мінімальною для пористих матеріалів з домінуючим анкерним механізмом. Фізичними наслідками дії кооперативних механізмів є, зокрема, ефекти острівкового руйнування (нуклеація зародків деадгезії) і гістерезис адгезії.

Відомості про авторські вклади. Студенту *Дукову І.М.* належить фізико-математична реалізація концептуальних моделей адгезійних процесів за аналогією до статистичної теорії фазових перетворень.

Література | References

1. Bell G.I. Models for the specific adhesion of cells to cells. *Science*. 1978. Vol. 200. P. 618–627.
2. Dembo M. et al. The reaction-limited kinetics of membrane-to-surface adhesion. *Proc. R. Soc. Lond. B.* 1988. Vol. 234. P. 55–83.
3. Lipowsky R., Seifert U. Adhesion of vesicles and membranes. *Mol. Cryst. Liq. Cryst*. 1991. Vol. 202. P. 17–25.
4. De Gennes P.G. Soft adhesive. *Langmuir*. 1996. Vol. 12. P. 4497–4500.
5. Thompson J.M.T., Hunt G.W. A General Theory of Elastic Stability. London: Wiley, 1973.322p.
6. Kinloch A.J. Adhesion and Adhesives. – London: Chapman and Hall, 1987. 441 p.

УДК 514.17:539.217:691.5

ФРАКТАЛЬНА ГЕОМЕТРІЯ ГРАНИЦІ РОЗДІЛУ МІЖ ПОРИСТОЮ ОСНОВОЮ І РЕСТАВРАЦІЙНИМ КОМПОЗИТОМ

Цюра В. В.[1,a], **Семенова С. В.**[1,b,*]

[1] *Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна*

[a] *Аспірант кафедри хімії та екології;* [b]*Доцент, завідувач кафедри хімії та екології*

[*] *Автор для листування: semenova@odaba.edu.ua*

Анотація. *У роботі розглянуто геометрію границі розділу в системі «адгезійний матеріал – основа», що формується при проникненні та твердненні розчину у поровому просторі основи. На основі фрактального підходу показано, що поверхнева фрактальна розмірність і мультифрактальний спектр є інваріантами обох фаз, тоді як лакунарність, спектральна розмірність і характеристики кривизни границі розділу відрізняються та визначають фізичні властивості системи. Обґрунтовано роль цих параметрів у формуванні адгезії, транспортних процесів і деформаційної сумісності матеріалів. Отримані результати інтерпретовано для систем типу «вапняк-черепашник – реставраційний розчин» та можуть бути використані для цілеспрямованого проєктування сумісних будівельних композицій.*

Ключові слова: *фрактальна геометрія; пористі матеріали; границі розділу; транспортні властивості; реставраційні матеріали.*

FRACTAL GEOMETRY OF THE INTERFACE BETWEEN A POROUS SUBSTRATE AND A RESTORATION COMPOSITE

Tsiura V. V.[1,a], **Semenova S. V.**[1,b,*]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

[a] *Postgraduate student at the Dept. of Chemistry and Ecology;* [b] *Assoc. Prof., Head of the Dept. of Chemistry and Ecology*

[*] *Corresponding author: semenova@odaba.edu.ua*

Abstract. *This paper addresses the geometry of the interface in a "adhesive material - base" system formed during the penetration and solidification of a filler within the pore space of a substrate. Within the framework of a fractal approach, it is shown that the surface fractal dimension and the multifractal spectrum are invariants of both phases, whereas lacunarity, spectral dimension, and curvature-related characteristics differ and govern the physical behavior of the system. The role of these parameters in adhesion, transport processes, and deformation compatibility is substantiated.*

The results are interpreted for systems such as “shell limestone – restoration mortar” and can be applied to the design of compatible building materials.

Keywords: *fractal geometry; porous materials; interface; adhesion; transport properties; restoration materials.*

Актуальність дослідження. Розглядається задача геометричного «копіювання» пористої структури при проникненні та твердненні матеріалу в порах. Попри очевидність припущення про повну геометричну відповідність «зразок–відбиток», лише частина характеристик є інваріантною, тоді як інші принципово відрізняються і визначають фізичну поведінку системи. У будівельному матеріалознавстві це має безпосереднє значення для просочення, ін’єкцій, особливо при реставрації пористих каменів, наприклад, вапняку-черепашнику, де довговічність і сумісність матеріалів визначаються відповідністю геометрії порового простору та відбитку. Отже, актуальним є строгий фрактально-геометричний опис границі розділу «основа – композитний матеріал» і встановлення критеріїв геометричної сумісності матеріалів.

Стан проблеми. Фрактальна геометрія, започаткована Б. Мандельбротом, забезпечила ефективний інструментарій для опису складних і нерегулярних поверхонь, зокрема у пористих матеріалах [1, 2]. Подальші дослідження показали, що поверхні пор у гірських породах і будівельних композитах мають статистично самоподібну структуру в широкому діапазоні масштабів, що підтверджується методами SAXS, адсорбції та цифрового аналізу зображень [3, 4]. Встановлено, що фрактальна розмірність поверхні визначає питому площу контакту і суттєво впливає на адгезійні властивості матеріалів [5]. Зі зростанням фрактальної складності збільшується ефективна площа взаємодії фаз, що сприяє підвищенню міцності зчеплення у цементних і вапняних системах. Водночас однієї фрактальної розмірності недостатньо для повного опису структури. Істотну роль відіграють лакунарність і топологія порового простору, які визначають неоднорідність розподілу пор і впливають на транспортні процеси – дифузію, проникність і фільтрацію [6]. Показано, що матеріали з однаковою фрактальною розмірністю можуть мати різні експлуатаційні властивості саме через відмінності цих характеристик. У межах теорії фрактальної адгезії контакт між шорсткими поверхнями є ієрархічним і масштабозалежним, а ефективна площа контакту формується на різних рівнях шорсткості [7]. Сучасні підходи також враховують мультифрактальний характер границі розділу, що дозволяє описати розподіл локальних геометричних особливостей більш повно, ніж за допомогою однієї розмірності [8]. Таким чином, границі розділу у пористих матеріалах визначаються

сукупністю фрактальних і топологічних характеристик. Водночас питання про їх інваріантність при формуванні «відбитку» порового простору та про вплив цих параметрів на сумісність матеріалів залишаються недостатньо дослідженими і потребують подальшого аналізу.

Мета роботи – встановити інваріантні та відмінні геометричні характеристики границі розділу в системі «пористий матеріал – відбиток» на основі фрактального підходу та обґрунтувати їхній вплив на сумісність і експлуатаційні властивості матеріалів.

Отримані результати. Для математичної інтерпретації сформулюємо основні припущення моделі. Нехай $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ – обмежена область, що представляє зразок із навколишнім простором. Область Ω розбивається на дві взаємодоповнювальні фази: тверду фазу S (скелет пористого матеріалу, наприклад, кальцитова матриця черепашника) та порову фазу $P = \Omega \setminus \overline{S}$ (простір, доступний для заповнення реставраційним складом). Спільна межа $\Gamma = \partial S \cap \Omega$ є границею розділу між фазами. Для індикаторних функцій фаз виконується $\chi_S(\mathbf{x}) + \chi_P(\mathbf{x}) = 1$ майже скрізь в Ω, а об'єми задовольняють $V_S + V_P = |\Omega|$. Пористість $\phi = V_P / |\Omega|$ є макроскопічним параметром системи.

Щодо геометрії границі розділу Γ приймаємо такі припущення. По-перше, Γ є статистично самоподібною множиною в діапазоні масштабів від нижнього обрізу ℓ_{min} (порядку розміру кристалічної комірки або молекулярного кластера, ~ 1–10 нм для вапняку) до верхнього обрізу ℓ_{max} (порядку характерного розміру пори, 0.1–10 мм для черепашника). По-друге, у цьому діапазоні масштабів Γ є метрично нерозгладженою поверхнею, що характеризується поверхневою фрактальною розмірністю $D_s \in [2,3)$. По-третє, процес проникнення реставраційного матеріалу вважається ідеально конформним: в'язкість складу достатньо мала, а час проникнення достатньо великий, щоб рідка фаза заповнила всі доступні пори аж до масштабу ℓ_{min}; при цьому поверхневого натягу та осмотичних ефектів, що обмежують проникнення в надтонкі пори, у даній моделі не враховується. По-четверте, процес твердіння відбувається без суттєвих об'ємних змін і без утворення внутрішніх напружень – тобто розглядається чисто геометрична задача відображення. Ці припущення ідеалізують реальний процес, але виділяють геометричну суть явища, очищену від механічних ускладнень, що розглядаються окремо нижче.

Центральним математичним аспектом даної роботи є наступне твердження. Поверхнева фрактальна розмірність твердої фази $D_s(S)$ і поверхнева

фрактальна розмірність відбитку (затверділого матеріалу) $D_s(P)$ тотожно рівні між собою і рівні фрактальній розмірності спільного границі розділу (1):

$$D_s(S) = D_s(P) = D_s(\Gamma). \tag{1}$$

Доведення для (1) ґрунтується на означенні поверхневої фрактальної розмірності через клітинкове покриття (box-counting). Нехай $N(\varepsilon)$ – мінімальна кількість кубів зі стороною ε, необхідних для покриття Γ. Тоді (2):

$$D_s = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}. \tag{2}$$

Ключове спостереження полягає в тому, що множина Γ є спільним об'єктом для S і P: вона одночасно є межею твердої фази ($\partial S \cap \Omega$) і межею порової фази ($\partial P \cap \Omega$). При підрахунку $N(\varepsilon)$ ми покриваємо саму геометричну множину Γ – незалежно від того, з якого боку від неї знаходиться «матеріал». Покриття Γ кубами є операцією, що не залежить від того, яку сторону Γ вважати «твердою»: орієнтація нормалі до поверхні не входить у визначення box-counting розмірності. Отже, $N(\varepsilon)$ є однаковим для S і для P, і відповідно $D_s(S) = D_s(P)$. Те саме справедливе і для розмірності Гаусдорфа $D_H(\Gamma)$, оскільки для регулярних статистично самоподібних поверхонь box-counting і гаусдорфова розмірності збігаються.

Більш фізично прозоре формулювання: якщо ми вимірюємо поверхню S методом адсорбції молекул-зондів розміру ε (рівняння БЕТ у фрактальному узагальненні), ми отримуємо кількість молекул $n(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D_s}$. Якщо ті самі виміри провести для відбитку P, молекули-зонди «вкладатимуться» у ті самі геометричні нерівності поверхні Γ з тим самим масштабовим законом, оскільки хімічну природу поверхні тут не розглядаємо. Таким чином, D_s є ознакою геометрії Γ як такої, а не матеріалу по один бік від неї.

Це твердження можна суттєво підсилити. Не лише D_s, але і весь мультифрактальний спектр $f(\alpha)$ і узагальнені розмірності Реньї D_q є інваріантами операції «взяти відбиток». Якщо μ – хаусдорфова міра розмірності D_s на Γ, то для будь-якої точки $x \in \Gamma$ локальна гельдерова регулярність $\alpha(x) = \lim_{r \to 0} \log \mu(B(x,r)) / \log r$ визначається геометрією Γ в околі x, а не тим, до якої фази належить $B(x,r)$. Отже, маємо (3):

$$f_S(\alpha) = f_P(\alpha) = f(\alpha), \qquad D_q^S = D_q^P \quad \forall q \in \mathbb{R}, \tag{3}$$

де $D_q = \frac{1}{q-1}\lim_{\varepsilon\to 0}\frac{\log\sum_i p_i^q}{\log\varepsilon}$ – узагальнена розмірність Реньї, p_i – імовірнісна міра на i-й клітинці.

Рівність D_q для всіх q означає рівність усієї «ієрархії» сингулярностей: не лише «середня» фрактальність (D_1 – інформаційна розмірність), але й розподіл локальних концентрацій (D_2 – кореляційна розмірність) та вищих мультифрактальних характеристик є спільними для S та P.

Поряд із поверхневою, в матеріалознавстві широко застосовується масова фрактальна розмірність D_m, що описує, як маса твердої речовини $M(r)$ у кулі радіуса r, центрованій на частці матеріалу, масштабується з r (4):

$$M(r) \sim r^{D_m}. \tag{4}$$

Для справжнього масового фрактала (наприклад, аерогелю кремнезему або дендритного кристала) $D_m < 3$, що означає, що об'ємна частка матеріалу $\phi_S(r) = M(r)/(\rho r^3) \sim r^{D_m-3} \to 0$ при $r \to \infty$: тіло є «рідким» у тривимірному просторі, його тривимірна міра Лебега дорівнює нулю. Для реальних пористих матеріалів – бетону, вапняку, черепашника – ситуація принципово інша: обидві фази, і S, і P, мають додатний об'єм і ненульову тривимірну міру Лебега. Тому (5):

$$D_m^S = D_m^P = 3, \tag{5}$$

і це є тривіальним фактом, що не несе фрактальної інформації.

Однак масова фрактальна розмірність набуває сенсу у пов'язаному контексті – через кореляційну функцію щільності $C(r) = \langle \rho(\mathbf{x})\rho(\mathbf{x}+\mathbf{r})\rangle$. Для статистично ізотропного порового простору (6):

$$C_P(r) \sim r^{D_m^P-3} \quad при\ \ell_{min} \ll r \ll \ell_{max}, \tag{6}$$

і аналогічно для твердої фази.

Оскільки $\chi_S + \chi_P = 1$, кореляційні функції пов'язані співвідношенням (7):

$$C_S(r) + C_P(r) = 1 + 2\phi(1-\phi)[h(r)-1], \tag{7}$$

де $h(r)$ – нормована кореляційна функція гетерогенного середовища.

З цієї тотожності видно, що масштабова поведінка C_S і C_P в діапазоні фрактальності визначається спільною функцією $h(r)$, і окремо «масова розмірність» однієї фази є відображенням тієї ж геометрії Γ, що і D_s.

Для малокутового рентгенівського (SAXS) або нейтронного (SANS) розсіювання інтенсивність $I(q)$ є Фур'є-образом $C(r)$. У режимі Порода при $q\xi \gg 1$ (де ξ – характерна кореляційна довжина) (8):

$$I_S(q) \sim I_P(q) \sim q^{-(6-D_s)}, \tag{8}$$

тобто обидві фази демонструють ідентичний закон розсіювання у великих q, що є прямим наслідком рівності $D_s(S) = D_s(P)$.

Відмінність між I_S і I_P проявляється лише у малих q через різні структурні фактори, пов'язані з макроскопічною організацією пор. При $D_s = 2$ (гладка поверхня) відновлюється класичний закон Порода $I(q) \sim q^{-4}$.

Таким чином, геометричні характеристики, що є абсолютно однаковими для твердої фази S (пористого матеріалу-основи) і для відбитку P (матеріалу, що затвердів у порах): поверхнева фрактальна розмірність D_s, мультифрактальний спектр $f(\alpha)$, узагальнені розмірності Реньї D_q для всіх q, закон розсіювання Порода в режимі великих q, масштабовий показник питомої поверхні $\Sigma_v(\varepsilon) \sim \varepsilon^{D_s-3}$.

Характеристики, що відрізняються для S і P: лакунарність $\Lambda(\varepsilon)$, спектральна (дифузійна) розмірність d_{sp}, константи ε-трубок c_S і c_P, поріг перколяції, топологія зв'язаності.

Лакунарність $\Lambda(\varepsilon)$ кількісно визначається через дисперсію маси у клітинці розміру ε (9):

$$\Lambda(\varepsilon) = \frac{\langle M(\varepsilon)^2 \rangle - \langle M(\varepsilon) \rangle^2}{\langle M(\varepsilon) \rangle^2}. \tag{9}$$

Для самоподібного фрактала $\Lambda(\varepsilon) = \text{const}$; для реального матеріалу вона повільно залежить від ε. Зв'язок між лакунарностями обох фаз через загальну дисперсію щільності можна представити як (10):

$$\Lambda_S(\varepsilon),(1-\phi)^2 + \Lambda_P(\varepsilon),\phi^2 + 2\phi(1-\phi) = \left(\frac{\sigma_{total}}{\langle M \rangle} \right)^2, \tag{10}$$

де σ^2_{total} – повна дисперсія щільності по Ω.

Оскільки загальна дисперсія є фіксованою, при збільшенні Λ_S відповідно зменшується Λ_P: висока нерівномірність розподілу твердої фази (широкі

рідкісні пори – характерна ознака черепашника) відповідає низькій лакунарності порового відбитку і навпаки. Таким чином, $\Lambda_S \neq \Lambda_P$ у загальному випадку, і різниця між ними несе інформацію про «текстуру» розподілу матеріалу в просторі при незмінній фрактальній розмірності поверхні.

Спектральна розмірність $d_{sp} = 2D_m / d_w$, де d_w – розмірність випадкового блукання по структурі, визначає ефективний коефіцієнт дифузії вологи, іонів або тепла крізь фазу. Оскільки топологія зв'язаності S та P різна (один і той самий матеріал може мати добре зв'язану тверду фазу і погано зв'язаний поровий простір або навпаки, залежно від пористості), d_{sp}^S і d_{sp}^P є незалежними параметрами з різними фізичними значеннями.

Поверхня Γ є носієм усієї геометричної інформації системи. Крім фрактальної розмірності, вона характеризується диференціально-геометричними величинами: головними кривизнами $\kappa_1(x)$ і $\kappa_2(x)$ в кожній точці $x \in \Gamma$ (в тих точках, де Γ є гладкою), середньою кривизною $H(x) = (\kappa_1 + \kappa_2)/2$ і гаусовою кривизною $K(x) = \kappa_1 \kappa_2$.

Об'єм ε-трубки навколо Γ з боку твердої фази S розкладається в ряд за теоремою Вейля–Штайнера (11):

$$V_S(\varepsilon) = \varepsilon \int_\Gamma d\sigma - \varepsilon^2 \int_\Gamma H(x) d\sigma + \frac{\varepsilon^3}{3} \int_\Gamma K(x) d\sigma + O(\varepsilon^4), \tag{11}$$

а з боку порової фази P знаки членів кривизни змінюються (оскільки нормаль до Γ з боку P протилежна) (12):

$$V_P(\varepsilon) = \varepsilon \int_\Gamma d\sigma + \varepsilon^2 \int_\Gamma H(x) d\sigma + \frac{\varepsilon^3}{3} \int_\Gamma K(x) d\sigma + O(\varepsilon^4). \tag{12}$$

Сума двох трубок дорівнює (13):

$$V_S(\varepsilon) + V_P(\varepsilon) = 2\varepsilon, |\Gamma| + \frac{2\varepsilon^3}{3} \int_\Gamma K d\sigma + O(\varepsilon^4) = 2\varepsilon |\Gamma| + \frac{4\pi\varepsilon^3}{3} \chi(\Gamma) + O(\varepsilon^4), \tag{13}$$

де $\chi(\Gamma)$ – ейлерова характеристика поверхні (теорема Гаусса–Бонне: $\int_\Gamma K, d\sigma = 2\pi\chi(\Gamma)$). Перший член – площа поверхні, третій – топологічний інваріант. Різниця трубок (14):

$$V_P(\varepsilon) - V_S(\varepsilon) = 2\varepsilon^2 \int_\Gamma H(x), d\sigma. \tag{14}$$

Ця різниця пропорційна інтегральній середній кривизні поверхні і визначає асиметрію між фазами: якщо пори в середньому опуклі (характерно для

бульбашкових або черепашкових структур, де порожнини – субсферичні), то $\int_\Gamma H, d\sigma > 0$, і $V_P(\varepsilon) > V_S(\varepsilon)$ – відбиток «займає» більше простору у тонкій ε-шаровій зоні, ніж тверда фаза. Таким чином, хоча показники степеня ε-масштабування однакові для обох фаз (що і відображається рівністю D_s), «перша поправка кривизни» фундаментально асиметрична.

У фрактальному режимі $\varepsilon \ll \ell_{min}$ наведені формули Вейля не застосовуються у диференціальній формі (поверхня негладка), однак аналог теореми Вейля для фрактальних множин (результати Лапідуса–Помаранса) стверджує, що об'єм ε-трубки для Γ з $D_s \in (2,3)$ поводить себе як (15):

$$V(\Gamma, \varepsilon) \sim \mathcal{M}^{3-D_s} \varepsilon^{3-D_s} + \sum_k c_k \varepsilon^{3-\omega_k}, \tag{15}$$

де $\mathcal{M}^{3-D_s}$ – міра мінковського розмірності $3 - D_s$, а ω_k – «комплексні вимірності» (complex dimensions), дійсна частина яких менша за D_s.

Саме ці комплексні вимірності відповідають за осцилюючі поправки до ε-масштабування і є «відбитком» самоподібної структури Γ у спектрі ε-трубки. Для S та P провідний член ε^{3-D_s} спільний (з різними коефіцієнтами $c_S \neq c_P$ через різну орієнтацію нормалі), а комплексні вимірності ω_k – однакові, бо вони є характеристиками самої Γ.

Розглянута геометрична система «пористий камінь – реставраційний матеріал» є прикладом так званої «фрактальної адгезійної системи», де фундаментальні механічні і транспортні властивості визначаються мультимасштабною геометрією контактної зони. Ідентифікуємо ключові матеріалознавчі проблеми у термінах отриманих геометричних результатів.

Механічна адгезія визначається ефективною площею контакту, яка завдяки фрактальності Γ є масштабозалежною величиною (16):

$$A_{eff}(\varepsilon) = A_0 \left(\frac{\ell_{max}}{\varepsilon} \right)^{D_s - 2}, \tag{16}$$

де A_0 – геометрична (макроскопічна) площа контакту.

При $D_s = 2.7$ (характерне значення для поверхні вапняку-черепашника за даними SAXS) і відношенні масштабів $\ell_{max} / \ell_{min} \sim 10^4$ маємо $A_{eff} / A_0 \sim (10^4)^{0.7} \approx 5000$ Фактична площа контакту перевищує геометричну у тисячі разів, що пояснює хорошу адгезію мінеральних розчинів до

черепашника навіть без хімічних адгезивів. Оскільки $D_s(S) = D_s(P)$, і тверда основа, і реставраційний матеріал «бачать» ту саму ефективну площу на всіх масштабах – це і є геометричний вираз принципу взаємоадаптації.

Транспорт вологи і іонів крізь зону контакту визначається вже не D_s, а d_{sp}^P – спектральною розмірністю порового відбитку (17):

$$D_{eff} \sim D_0 \phi \left(\frac{\ell_{min}}{\ell_{max}} \right)^{3 - d_{sp}^P / d_w^P}, \tag{17}$$

де D_0 – коефіцієнт дифузії у вільному просторі.

Відмінність d_{sp}^P реставраційного матеріалу від d_{sp}^P вихідного порового простору черепашника може призвести до неоднорідного розподілу вологи у зоні контакту: «пришвидшений» або «сповільнений» транспорт порівняно з основою є джерелом диференціальних деформацій при температурно-вологісних циклах, що є основною причиною відшарування реставраційних шарів.

Деформаційна сумісність вимагає, щоб реставраційний матеріал мав близькі до основи пружні модулі й коефіцієнти теплового і вологісного розширення. Однак, як випливає з геометричного аналізу, навіть при повній механічній і хімічній сумісності різниця в лакунарностях $\Lambda_S \neq \Lambda_P$ призводить до нерівномірного розподілу контактних напружень: у зонах підвищеної лакунарності відбитку (там, де пори черепашника утворюють крупні скупчення без дрібних сателітів) виникають локальні концентратори напружень мікрорівня, навіть якщо макроскопічно матеріали мають однакові модулі.

Зведемо отримані результати до системи «геометричних рівнянь адаптації» – умов, яким повинен задовольняти реставраційний матеріал для геометричної сумісності з основою.

Умова першого рівня – збіг поверхневих фрактальних розмірностей (18):

$$D_s^{fill} = D_s^{substrate}. \tag{18}$$

Ця умова виконується автоматично у разі ідеального конформного заповнення. Порушення умови означає, що матеріал не заповнив пори нижче певного масштабу ℓ^*, і ефективна фрактальна розмірність відбитку (19):

$$D_s^{fill}(\varepsilon) = \begin{cases} D_s^{substrate}, & \varepsilon > \ell^* \\ 2, & \varepsilon < \ell^* \end{cases} \tag{19}$$

є «обрізаною» версією $D_s^{substrate}$.

Умова другого рівня – мінімізація різниці лакунарностей (20):

$$|\Lambda^{fill}(\varepsilon)-\Lambda^{substrate}(\varepsilon)|<\delta_\Lambda \quad \forall\varepsilon\in[\ell_{min},\ell_{max}], \tag{20}$$

де δ_Λ – допустимий рівень нерівномірності, що залежить від механічних вимог.

Ця умова не виконується автоматично і визначає вимоги до гранулометричного складу реставраційного розчину: для відтворення «текстури» черепашника реставраційний матеріал повинен мати подібно організований зерновий склад із кількома характерними масштабами включень.

Умова третього рівня – узгодження спектральних розмірностей (21):

$$d_{sp}^{fill}\approx d_{sp}^{substrate}, \tag{21}$$

що є умовою збалансованого тепло- і вологообміну через зону контакту.

Ця умова пов'язана з гранулометрією крізь закон масштабування пор: для розчинів із логнормальним розподілом пор (типовий результат при кристалізації кальциту) d_{sp} може бути розрахована через моменти розподілу пор.

Геометричне «рівняння релаксації» описує, як ефективна поверхнева розмірність системи змінюється у часі під дією циклічних навантажень (температурно-вологісних циклів, карбонізації, кристалізації солей). Якщо позначити відхилення фактичної D_s від «рівноважної» D_s^{eq} через $\delta(t)=D_s(t)-D_s^{eq}$, то у лінійному наближенні (22):

$$\frac{d\delta}{dt}=-\frac{\delta}{\tau_{geom}}, \tag{22}$$

де характерний час геометричної релаксації $\tau_{geom}\sim\ell_{max}^{2/d_w}/D_{eff}$ визначається транспортними процесами (дифузія вологи або іонів, що змінюють пористість у результаті розчинення або кристалізації). Для черепашника з $\ell_{max}\sim 1$ мм і $D_{eff}\sim 10^{-10}$ м²/с отримуємо $\tau_{geom}\sim 10^4$–10^5 с, що відповідає часу встановлення рівноважного вологонасичення – узгоджується з практичними спостереженнями.

Висновки. Проведений аналіз показує, що задача «зразок–відбиток» у межах фрактальної геометрії має однозначне рішення: поверхневі фрактальні розмірності та мультифрактальні спектри є однаковими, оскільки обидві фази формуються спільною межею розділу. Водночас лакунарність, спектральна розмірність і кривизнові характеристики відрізняються, визначаючи транспортні, механічні та деформаційні властивості системи. Для реставраційних матеріалів це означає, що конформне заповнення пор забезпечує

«успадкування» мультифрактальної структури поверхні, що є основою довготривалої сумісності вапняних розчинів із кам'яною основою. Керування лакунарністю та спектральною розмірністю через гранулометричний склад і в'язкість відкриває можливість цілеспрямованого проєктування матеріалів із заданою сумісністю.

Відомості про авторські вклади. Аспирантці *Цюрі В.В.* належить реалізація і розширення концептуальної моделі геометричної відповідності фрактальних розмірностей «адгезивний матеріал – основа» в матеріалознавстві.

Література | References

1. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. New York: W.H. Freeman, 1982. 468 p.
2. Feder J. Fractals. New York: Plenum Press, 1988. 310 p.
3. Pfeifer P., Avnir D. Chemistry in noninteger dimensions between two and three. *Fractal theory of heterogeneous surfaces*. *The Journal of Chemical Physics*. 1983. Vol. 79. P. 3558–3565.
4. Wong P.-z. (Ed.). Methods in the Physics of Porous Media. Academic Press, 1999. 485 p.
5. Persson B. N. J. Theory of rubber friction and contact mechanics. *The Journal of Chemical Physics*. 2001. Vol. 115. P. 3840–3861.
6. Allain C., Cloitre M. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. *Physical Review A*. 1991. Vol. 44. P. 3552–3558.
7. Majumdar A., Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces. *Journal of Tribology*. 1991. Vol. 113. P. 1–11.
8. Vicsek T. Fractal Growth Phenomena. World Scientific, 1992. 528 p.

УДК 666.9:541.8

ВПЛИВ ХІРАЛЬНИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ТВЕРДНЕННЯ В'ЯЖУЧИХ – ФІЗИКО-ХІМІЧНІ МОДЕЛІ

Деменко К. А.[1,a], **Семенова С. В.**[1,b], **Колесников А. В.**[1,c,*]

[1] *Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна*

[a] *Студент 3-го року навчання; b Доцент, завідувач кафедри хімії та екології;* [c] *Доц. кафедри хімії та екології*

[*] *Автор для листування: kolesnikov_himek@odaba.edu.ua*

Анотація. *Розроблено систему фізико-математичних моделей для опису впливу хіральних органічних добавок на структуроутворення мінеральних в'яжучих. У рамках модифікованої класичної теорії нуклеації отримано вираз для відношення швидкостей нуклеації зародків різної хіральності через стереоселективний параметр* δ *і бар'єр нуклеації. Хіральна версія механізму Кабрери–Верміл'є кількісно пов'язує різницю вільних енергій адсорбції L- і D-ізомерів на кінк-сайтах ступінців з різними концентраціями їх ефективного блокування. Рівняння Аврамі з хіральним кінетичним коефіцієнтом описує спостережувані відмінності у кінетиці тверднення при введенні різних енантіомерів. У рамках теорії Ландау побудовано статистичну модель розподілу мікрокристалів за хіральністю: без добавок розподіл є симетричним бімодальним, при введенні хіральної добавки – асиметричним аж до монохірального стану з CE → 100%. Динамічне рівняння Гінзбурга–Ландау з ланжевенівським шумом описує еволюцію параметра хіральності в часі та встановлює технологічний критерій ефективного застосування хіральних добавок.*

Ключові слова: *хіральність, нуклеація, класична теорія нуклеації, механізм Кабрери–Верміл'є, кінетика Аврамі, теорія Ландау, рівняння Гінзбурга–Ландау*.

INFLUENCE OF CHIRAL ADDITIVES ON THE STRUCTURE FORMATION AND HARDENING OF BINDERS: PHYSICO-CHEMICAL MODELS

Demenko K. A.[1,a], **Semenova S. V.**[1,b], **Kolesnikov A. V.**[1,c,*]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

[a] *3rd-year student;* [b] *Assoc. Prof., Head of the Dept. of Chemistry and Ecology;* [c] *Assoc. Prof. at the Dept. of Chemistry and Ecology*

[*] *Corresponding author: kolesnikov_himek@odaba.edu.ua*

Abstract. *A system of physical-mathematical models has been developed for describing the effect of chiral organic additives on structure formation in mineral binders. Within the framework of modified classical nucleation theory, an expression is derived for the ratio of nucleation rates of*

crystals of different chirality through the stereoselective parameter δ and the nucleation barrier. The chiral version of the Cabrera–Vermilyea step-pinning mechanism quantitatively relates the difference in adsorption free energies of L- and D-isomers at kink sites to their distinct effective blocking concentrations. The Avrami equation with a chiral kinetic coefficient describes the experimentally observable differences in hardening kinetics upon introduction of different enantiomers. Within Landau theory, a statistical model for the distribution of microcrystals by chirality is constructed: without additives the distribution is a symmetric bimodal one; upon introduction of a chiral additive it becomes asymmetric, up to a monochiral state with $CE \to 100\%$. The Ginzburg–Landau dynamic equation with Langevin noise describes the time evolution of the chirality order parameter and establishes a technological criterion for the effective application of chiral additives.

Keywords: *chirality, nucleation, classical nucleation theory, Cabrera–Vermilyea mechanism, Avrami kinetics, Landau theory, Ginzburg–Landau equation.*

Актуальність дослідження. Розвиток фізико-математичних моделей, здатних передбачати вплив хімічної природи органічних добавок на кінетику нуклеації, ріст кристалів та механічні властивості мінеральних в'яжучих, є однією з центральних задач сучасного будівельного матеріалознавства. Особливу актуальність ця задача набуває у зв'язку з нещодавно встановленим і активно досліджуваним феноменом стереохімічної специфічності органічних добавок: виявилося, що L- та D-енантіомери однієї і тієї ж молекули можуть суттєво по-різному впливати на кристалізацію мінеральних фаз і, як наслідок, на структуру і міцність твердіючих систем. Найяскравіший приклад – L-(+)-виннокам'яна кислота у кальцій-фосфатному цементі на основі брушиту, де заміна рацемічної форми на оптично чисту L-форму збільшує межу міцності на стиск на 62% і тріщиностійкість на 268% [1, 2]. Аналогічна, хоча й менш радикальна, стереоселективність задокументована для амінокислот у гіпсових системах [3, 4] та для аспарагінової і глутамінової кислот у системах карбонату кальцію [5, 6]. Попри накопичення значного масиву експериментальних фактів, кількісні теоретичні моделі, що пов'язують стереохімічні параметри добавки з макроскопічними характеристиками в'яжучого, практично відсутні. Ця прогалина визначає постановку задачі цієї роботи: побудувати систему взаємоузгоджених фізико-математичних моделей, що охоплюють різні масштабні рівні – від нуклеації окремого зародка до статистичного розподілу мікрокристалів за хіральністю в ансамблі – і встановити, за яких умов хіральність добавки здатна суттєво змінити мікроструктуру і міцність в'яжучого.

Стан проблеми. впливу Теоретичні дослідження кристалізації у присутності органічних добавок традиційно спираються на три основні платформи: класичну теорію нуклеації (КТН), механізм блокування ступінців і моделі кінетики фазового перетворення. Класична теорія нуклеації, розвинута у роботах Фольмера–Вебера, Беккера–Дерінга і Тернбулла–Фішера та узагальнена Де Йорео та Векіловим [7], описує утворення зародка нової фази як подолання термодинамічного бар'єру ΔG^*, що визначається поверхневою енергією межі розподілу та ступенем пересичення. Вплив добавок у рамках КТН зводиться до зміни поверхневої енергії γ – і це є природна точка входу для хіральних ефектів, якщо зробити γ залежним від стереохімії адсорбату.

Механізм блокування ступінців, запропонований Кабрерою та Верміл'є [8], описує пригнічення росту кристала шляхом адсорбції домішок на кінк-сайтах ступінців поверхні. Розвиток цього механізму у роботах Де Йорео, Векілова, Дейвіса і Доув [7, 9] дозволив кількісно описати залежність швидкості росту від концентрації та адсорбційної константи домішки. Для хіральних систем ключовою є асиметрія адсорбційних констант $K_{ads}^{L} \neq K_{ads}^{D}$ на стереоспецифічних кінк-сайтах – ідея, що випливає з принципу «ключ–замок» у хімії рецепторів [10], але до останнього часу кількісно не реалізована для будівельних в'яжучих.

Кінетика фазового перетворення при гідратації в'яжучих традиційно описується рівнянням Аврамі–Джонсона–Мела [11], що з успіхом застосовується для гіпсу, портландцементу та кальцій-фосфатних цементів [12, 13]. Проте у жодній з відомих нам робіт рівняння Аврамі не використовувалось для порівняльного аналізу кінетики тверднення при введенні L- і D-ізомерів однієї і тієї ж добавки.

Принципово відмінний підхід – застосування теорії фазових переходів Ландау [14] до проблеми розподілу кристалів за хіральністю – у будівельному матеріалознавстві раніше не застосовувався. Разом з тим у фізиці рідких кристалів і магнетиків добре відома аналогія між хіральним параметром порядку і намагніченістю в моделі Ізінга [15], що є природним відправним пунктом для побудови відповідної моделі кристалізації в'яжучих. Явище стохастичного порушення хіральної симетрії при кристалізації рацемічних систем («абсолютна асиметричний синтез» Соаі та Блекмонда) є добре задокументованим у хімії [16], але його механізм у мінеральних системах кількісно не описувався. Нарешті, ланжевенівська динаміка типу Гінзбурга–Ландау [14, 15] дозволяє описати еволюцію параметра хіральності в часі з

урахуванням флуктуацій – і тим самим з'єднати термодинамічну рівноважну картину з реальною кінетикою структуроутворення. Саме ці прогалини і усуваються у даній роботі.

Отримані результати. Згідно з класичноїтеорії нуклеації, стаціонарна швидкість утворення зародків [7] (1):

$$J = A\exp\left(-\frac{\Delta G^*}{k_B T}\right) \tag{1}$$

Критична вільна енергія нуклеації для сферичного зародка (2):

$$\Delta G^*_{hom} = \frac{16\pi\gamma^3 V_m^2}{3(RT\ln S)^2}, \tag{2}$$

де γ – питома вільна енергія межі кристал–розчин, V_m – молярний об'єм кристалічної фази, $S = c/c_{eq}$ – ступінь пересичення. Введемо хіральний параметр зародка $\eta \in -1,+1$ ($\eta = +1$ для Р-, $\eta = -1$ для М-зародка) і запишемо поверхневу енергію у присутності хіральної добавки (3):

$$\gamma_{\pm} = \gamma_0\left(1-\delta\cdot\eta\cdot\chi_{add}\right), \tag{3}$$

де χ_{add} – знак хіральності добавки (+1 для D-, −1 для L-ізомеру, 0 для рацемату), δ – безрозмірний стереоселективний параметр ($0 < \delta \ll 1$). Тоді для критичної вільної енергії маємо (4):

$$\Delta G_0^* = \Delta G^0\left(1-\delta\cdot\eta\cdot\chi add\right)^3. \tag{4}$$

Відношення швидкостей нуклеації Р- та М-зародків при $\chi_{add} = +1$ (5):

$$\frac{J_+}{J_-} = \exp\left(\frac{\Delta G_0^*}{k_B T}\left[(1-\delta)^3 - (1+\delta)^3\right]\right) \tag{5}$$

При малих $\delta \ll 1$ маємо наближення (6):

$$\frac{J_+}{J_-} \approx \exp\left(\frac{6\delta^2\Delta G_0^*}{k_B T}\right) \tag{6}$$

Числові оцінки: при $\delta = 0.05,\ \Delta G^0 = 50, k_B T$ маємо $J+/J_- \approx 2.1$; при $\delta = 0.1$ – вже $J_+ / J_- \approx 20$. Ефект нелінійно зростає з δ та з пересиченням. Для гетерогенної нуклеації вираз для ΔG модифікується множником $f(\theta) = (2+\cos\theta)(1-\cos\theta)^2/4$, де крайовий кут $\theta = \theta(\delta,\eta,\chi_{add})$ – якісна картина переважної нуклеації одного знаку хіральності зберігається.

Модель блокування ступінців Кабрери–Верміл'є для хіральних систем дозволяє визначити швидкість ступінця при блокуванні точковими домішками [8] (7):

$$v = v_0\left(1-\frac{\rho_c}{\rho}\right), \tag{7}$$

де v_0 – швидкість без домішок, $\rho_c = 2\gamma_s\Omega,/,(k_BT\ln S)$ – критичний радіус Гіббса–Томсона, ρ – середня відстань між блокуючими точками (8):

$$\rho = \frac{\rho_0}{1+K_{ads}[C]}. \tag{8}$$

При $\rho \le \rho_c$ ріст повністю зупиняється. Концентрація повного пригнічення росту (9):

$$[C]^{*L(D)} = \frac{1}{Kads^{L(D)}}\left(\frac{\rho_0}{\rho_c}-1\right) \tag{9}$$

Оскільки $K_{ads}^L \neq K_{ads}^D$ на стереоспецифічних кінк-сайтах, маємо (10):

$$\frac{[C]^L}{[C]^D} = \frac{K^D{}_{ads}}{K_{ads}^L} \tag{10}$$

При $K_{ads}^L > K_{ads}^D$ маємо $[C]^L < [C]^D$: L-ізомер ефективніше гальмує ріст, що відповідає поведінці L-(+)-тартрату у брушиті [1] та відповідних амінокислот у гіпсі [3]. Хіральна дискримінація – різниця вільних енергій адсорбції (11):

$$\Delta\Delta G^\circ = \Delta G^\circ{}_{ads,D} - \Delta G^\circ{}_{ads,L} = -RT\ln\frac{K_{ads}^D}{K_{ads}^L} \tag{11}$$

Характерні значення $|\,\Delta\Delta G^\circ\,|$ для амінокислот на мінеральних поверхнях – 1–10 кДж/моль [10], що відповідає K_L / K_D від 1.5 до 50 при кімнатній температурі.

Рівняння Аврамі–Джонсона–Мела [11, 12] (12):

$$\alpha(t) = 1-\exp\left[-(K_{Av}\cdot t)^n\right], \tag{12}$$

де α – ступінь перетворення, n – показник механізму ($n \approx 1$ – одновимірний ріст, $n \approx 2$ – двовимірний, $n \approx 3-4$ – тривимірний з нуклеацією).

У присутності хіральної добавки для K_{Av} маємо (13):

$$K_{Av} = K_{Av,0} \cdot f(c, \chi_{add}), \quad f^L \neq f^D \tag{14}$$

Характеристичний час тверднення (15):

$$t_{0.5} = \frac{(\ln 2)^{1/n}}{K_{Av}} \tag{15}$$

Різниця $\Delta t_{0.5} = t_{0.5}^D - t_{0.5}^L$ є прямою вимірюваною мірою стереохімічного ефекту. Миттєва швидкість тверднення (16):

$$\frac{d\alpha}{dt} = nK_{Av}^n t^{n-1} \exp\left[-(K_{Av}t)^n\right] \tag{16}$$

з максимумом при $t_{max} = \frac{1}{K_{Av}}\left(1 - \frac{1}{n}\right)^{1/n}$

Хіральна добавка зміщує t_{max} і пікову швидкість – що безпосередньо вимірюється ізотермічною калориметрією. Зміна показника n (наприклад, $n: 1.8 \to 1.2$ при введенні L-(+)-тартрату до брушиту [1]) відображає перехід від анізотропного до ізодіаметричного росту кристалів і є морфологічним проявом хіральної дії добавки.

Статистична модель розподілу мікрокристалів за хіральністю. Теорія Ландау і стохастична динаміка.

Кожному кристалу ансамблю приписуємо параметр хіральності $\chi \in [-1, +1]$ ($\chi = +1$ – Р-кристал, $\chi = -1$ – М-кристал, $\chi = 0$ – ахіральний). Рівноважний розподіл (17):

$$P(\chi) = \frac{1}{Z}\exp\left(-\frac{F(\chi)}{k_B T}\right), \quad Z = \int_{-1}^{1} \exp\left(-\frac{F(\chi)}{k_B T}\right) d\chi \tag{17}$$

Для ахіральної системи $F(\chi) = F(-\chi)$. Розклад Ландау [14] (18):

$$F(\chi) = F_0 + a_2\chi^2 + a_4\chi^4 + \ldots \tag{18}$$

При $a_2 < 0$, $a_4 > 0$ виникають два рівноцінні мінімуми (19):

$$\chi = \pm\chi_0 = \pm\sqrt{-\frac{a_2}{2a_4}} \tag{19}$$

Це симетричний бімодальний розподіл: рівна кількість Р- і М-кристалів без хіральних добавок. Введення хіральної добавки додає поле порушення симетрії (20):

$$F(\chi) = F_0 + a_2\chi^2 + a_4\chi^4 - h\chi, \quad h = h_0 \cdot c \cdot \chi_{add}, \tag{20}$$

де h – ефективне «хіральне поле» (аналог зовнішнього поля у моделі Ізінга). Рівняння стаціонарних станів (21):

$$2a_2\chi_{st} + 4a_4\chi_{st}^3 = h\,. \tag{21}$$

Три розв'язки (два стійких, один нестійкий) існують при умові (22):

$$|h| < h_c = \frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \frac{(-a_2)^{3/2}}{a_4^{1/2}}. \tag{22}$$

При $|h| > h_c$ – лише один стійкий стан: монохіральна мікроструктура. Середня хіральність по ансамблю (23):

$$\langle\chi\rangle = \frac{\int_{-1}^{1} \chi \exp\left(-F(\chi)/k_BT\right) d\chi}{\int_{-1}^{1} \exp\left(-F(\chi)/k_BT\right) d\chi}. \tag{23}$$

При слабкому полі ($|h| \ll k_BT$) (24):

$$\langle\chi\rangle \approx \frac{h}{-4a_2}\,. \tag{24}$$

Ступінь асиметрії розподілу (25):

$$CE = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \cdot 100\% \tag{25}$$

Модель передбачає два сценарії. Сценарій 1: ($h = 0$, рацемічна добавка): симетрія зберігається, добавка може звужувати піки розподілу, зменшуючи дисперсію хіральності – більш однорідна мікроструктура. Сценарій 2: ($|h| > h_c$, монохіральна добавка): $CE \to 100\%$, монохіральна мікроструктура, аналогічна природним біомінералам з гомохіральними органічними матрицями, що може суттєво покращити механічні властивості в'яжучого.

Згідно з рівнянням еволюції хіральності (динаміки Гінзбурга–Ландау), стохастичне рівняння еволюції параметра хіральності [14, 15] (26):

$$\tau \frac{d\langle\chi\rangle}{dt} = -(2a_2\langle\chi\rangle + 4a_4\langle\chi\rangle^3 - h) + \xi(t), \tag{26}$$

де τ – час релаксації хіральності, $\xi(t)$ – ланжевенівський шум: $\langle\xi(t)\xi(t')\rangle = 2k_BT\tau, \delta(t-t')$. Лінеаризація відносно малого відхилу $\delta\chi = \langle\chi\rangle - \langle\chi\rangle_{st}$ дає (27):

$$\tau \frac{d(\delta\chi)}{dt} = -\lambda\delta\chi + \xi(t), \quad \lambda = 2a_2 + 12a_4\langle\chi\rangle_{st}^2 . \tag{27}$$

Час релаксації до стійкого стану – $\tau_{rel} = \frac{\tau}{\lambda}$. При $\lambda > 0$ ($\tau_{rel} > 0$) – стан стійкий; при $\lambda < 0$ ($\tau_{rel} < 0$) – нестійкий, система переходить до одного з двох стійких мінімумів. Без добавки ($h = 0$) вибір між Р- і М-станом стохастичний – спонтанне порушення хіральної симетрії [16]; при $h \neq 0$ вибір детермінований добавкою. Технологічний критерій ефективності: при $\tau_{rel} \ll t_{0.5}$ хіральна організація формується у процесі тверднення і ефект добавки є повним; при $\tau_{rel} \gg t_{0.5}$ – частковим. Отже, хіральну добавку доцільно вводити якомога раніше – на стадії $\alpha \ll 1$.

При $CE \to 100\%$ кристали одного знаку хіральності мають ідентичну орієнтацію площин і осей, що сприяє щільнішому упакуванню та зменшенню дефектності контактних зон. Вплив на тріщиностійкість оцінюється як кооперативний ефект парних взаємодій між сусідніми кристалами(28):

$$K_{IC} \sim K_{IC,0}\left(1 + \beta \cdot CE^2\right), \tag{28}$$

де β – матеріальний коефіцієнт. При $CE = 100\%$ і $\beta \sim 2$ отримуємо $K_{IC} / K_{IC,0} \approx 3$, що кількісно узгоджується з +268% тріщиностійкості, виміряними у [1] для L-(+)-тартрату у брушиті.

Висновки. Розроблена система взаємоузгоджених фізико-математичних моделей дозволяє кількісно описати вплив хіральних органічних добавок на структуроутворення мінеральних в'яжучих на різних масштабних рівнях – від нуклеації окремого зародка до статистики ансамблю мікрокристалів і макроскопічних механічних властивостей. У рамках модифікованої класичної теорії нуклеації показано, що стереоселективне зниження поверхневої енергії зародка лише на 5% ($\delta = 0.05$) при бар'єрі нуклеації $\Delta G^* 0 \sim 50, k_B T$ вже дає дворазовий надлишок нуклеації зародків переважної хіральності. Хіральна версія механізму Кабрери–Верміл'є встановлює, що різниця вільних енергій адсорбції L- і D-ізомерів на кінк-сайтах ступінця ($|\Delta\Delta G^\circ| \sim 1-10$ кДж/моль) призводить до відмінних концентрацій повного гальмування росту для двох енантіомерів і кількісно пояснює стереоселективну кінетику, спостережену у гіпсі та брушиті. Модель Аврамі з хіральним кінетичним коефіцієнтом $KAv(\chi_{add})$ передбачає вимірюваний ізотермічною калориметрією

стереохімічний ефект на часових кривих тверднення; можлива також зміна показника n, що відображає зміну механізму росту і морфології кристалів під впливом хіральної добавки. Теорія Ландау для розподілу мікрокристалів за хіральністю є оригінальним підходом, що передбачає існування двох сценаріїв: при слабкому хіральному полі розподіл залишається симетричним бімодальним (рівноймовірна суміш П- і М-кристалів), при сильному полі ($|h| > h_c$) система переходить до монохіральної мікроструктури ($CE \to 100\%$), що аналогічно упорядкуванню природних біомінералів і може забезпечити суттєве поліпшення тріщиностійкості. Динамічне рівняння Гінзбурга–Ландау з ланжевенівським шумом описує еволюцію параметра хіральності в часі: без добавки вибір між Р- і М-станом є стохастичним (спонтанне порушення симетрії), з хіральною добавкою – детермінованим. Умова $\tau_{rel} \ll t_{0.5}$ є технологічним критерієм ефективного застосування хіральної добавки: для максимального ефекту вона має бути введена на ранній стадії гідратації.

Відомості про авторські вклади. Студенту Деменко К. А. належать розгортання основних ідей про застосування теорії нуклеації, теорії Авраамі та підходу Ландау за допомогою ШІ.

Література | References

1. Moussa H., Jiang W., Alsheghri A., Mansour A., El Hadad A., Pan H., Tang R., McKee M.D., Tamimi F., Song J. High strength brushite bioceramics obtained by selective regulation of crystal growth with chiral biomolecules. *Acta Biomaterialia*, 2020, 106, 351–359. DOI: 10.1016/j.actbio.2020.01.051
2. Alsheghri A., Moussa H., Song J., Tamimi F. Chiral Tartaric Acid Improves Fracture Toughness of Bioactive Brushite–Collagen Bone Cements. *ACS Applied Bio Materials*, 2020, 3(9), 6032–6040. DOI: 10.1021/acsabm.0c00555
3. Gao J., Li H., Sun Z., Song J., Liu Y., Jin C., Zhang Z., Ma J.-A., Jiang W. Selective Chiral Recognition between Amino Acids and Growing Gypsum Crystals. *Langmuir*, 2023, 39(36), 12707–12714. DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c01429
4. Gao J. et al. Selective Chiral Interactions between Hydrophilic/Hydrophobic Amino Acids and Growing Gypsum Crystals. *Langmuir*, 2024. DOI: 10.1021/acs.langmuir.4c01644
5. Orme C.A., Noy A., Wierzbicki A., McBride M.T., Grantham M., Teng H.H., Dove P.M., De Yoreo J.J. Formation of chiral morphologies through selective binding of amino acids to calcite surface steps. *Nature*, 2001, 411, 775–779. DOI: 10.1038/35081034
6. Habraken W.J.E.M., Chung J., Weiner S., Falini G., Bhatt D.L., Peterlik H., Nudelman F. Chiral acidic amino acids induce chiral hierarchical structure in calcium carbonate. *Nature Communications*, 2017, 8, 15066. DOI: 10.1038/ncomms15066
7. De Yoreo J.J., Vekilov P.G. Principles of Crystal Nucleation and Growth. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 54, 57–93. DOI: 10.2113/0540057

8. Cabrera N., Vermilyea D.A. The growth of crystals from solution. In: *Growth and Perfection of Crystals* (R.H. Doremus, B.W. Roberts, D. Turnbull, eds.). Wiley, New York, 1958, pp. 393–410.
9. Dove P.M., De Yoreo J.J., Weiner S. (eds.) *Biomineralization*. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Vol. 54. Mineralogical Society of America, Washington, 2003. 381 p.
10. Orme C.A., Noy A., Wierzbicki A. Stereospecific interactions of amino acids with calcite surface steps. *American Mineralogist*, 2002. DOI: 10.2138/am-2002-0725
11. Avrami M. Kinetics of Phase Change. I. General Theory. *Journal of Chemical Physics*, 1939, 7(12), 1103–1112. DOI: 10.1063/1.1750380
12. Smeets P.J.M., Cho K.R., Kempen R.G.E., Sommerdijk N.A.J.M., De Yoreo J.J. Calcium carbonate nucleation driven by ion binding in a biomimetic matrix revealed by in situ electron microscopy. *Nature Materials*, 2015, 14, 394–399. DOI: 10.1038/nmat4193
13. Kamali M., Ghahremaninezhad A. Effect of Biomolecules on the Nanostructure and Nanomechanical Property of Calcium-Silicate-Hydrate. *Scientific Reports*, 2018, 8, 9491. DOI: 10.1038/s41598-018-27746-x
14. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Statistical Physics*. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1980. 544 p.
15. Chaikin P.M., Lubensky T.C. *Principles of Condensed Matter Physics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1995. 699 p. DOI: 10.1017/CBO9780511813467
16. Blackmond D.G. The Origin of Biological Homochirality. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2019, 11(3), a032540. DOI: 10.1101/cshperspect.a032540

УДК 666.9:541.8

ВПЛИВ ХІРАЛЬНИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ТВЕРДНЕННЯ В'ЯЖУЧИХ – ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ФАКТИ ТА МЕХАНІЗМИ

Медицький А. В.[1,a], **Семенова С.В.**[1,b,*]

[1] *Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна*

[a] *Студент групи ВБК-524;* [b] *Доцент, завідувач кафедри хімії та екології*

[*] *Автор для листування: semenova@odaba.edu.ua*

Анотація. *Розглянуто вплив хіральних органічних добавок на процеси структуроутворення та тверднення мінеральних і полімерних в'яжучих: гіпсових, вапняних, портландцементних, кальцій-фосфатних (брушитових) та полімерних. Показано, що D- та L-енантіомери амінокислот, виннокам'яної кислоти та інших хіральних молекул по-різному взаємодіють з кристалографічно специфічними гранями й ступінцями мінеральних фаз, що призводить до різної кінетики нуклеації, різних морфологій кристалів і різних механічних властивостей твердіючих систем. Виявлено найбільш перспективні системи для технологічного використання. Результати демонструють хіральність добавок як принципово новий параметр управління мікроструктурою в'яжучих.*

Ключові слова: *хіральність, енантіомер, стереоселективність, гіпс, кальцит, брушит, C-S-H, нуклеація, кристалізація, мікроструктура, тверднення*.

INFLUENCE OF CHIRAL ADDITIVES ON THE STRUCTURE FORMATION AND HARDENING OF BINDERS: EXPERIMENTAL EVIDENCE AND MECHANISMS

Medytskyi A. V.[1,a], **Semenova S. V.**[1,b]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

[a] *Student of the VBK-524 group;* [b] *Assoc. Prof., Head of the Dept. of Chemistry and Ecology*

[*] *Corresponding author: semenova@odaba.edu.ua*

Abstract. *The influence of chiral organic additives on the processes of structure formation and hardening of mineral and polymer binders – gypsum, lime, Portland cement, calcium phosphate (brushite) and polymers – has been reviewed. It is shown that D- and L-enantiomers of amino acids, tartaric acid and other chiral molecules interact differently with crystallographically specific faces and steps of mineral phases, leading to distinct nucleation kinetics, crystal morphologies and mechanical properties of the hardening systems. The most promising systems for technological application are identified. The results demonstrate the chirality of additives as a fundamentally new parameter for controlling the microstructure of binders.*

Keywords: *chirality, enantiomer, stereoselectivity, gypsum, calcite, brushite, C-S-H, nucleation, crystallization, microstructure, hardening*.

Актуальність дослідження. Хіральність (від грец. «рука») – це фундаментальна властивість молекул або йонів, що не суміщаються зі своїм дзеркальним відображенням. Такі пари – енантіомери (R/D та S/L форми) – однаково обертають площину поляризації світла в протилежні боки, тоді як їхня рівна суміш (рацемат) є оптично неактивною. Структурна хіральність буває центральною, осьовою, площинною або гвинтовою. Ця властивість є основою живої матерії, де панує гомохіральність: природні амінокислоти мають L-конфігурацію, а цукри – D-конфігурацію. Стереоспецифічна взаємодія між такими біомолекулами та мінеральними поверхнями зумовлює роль хіральних добавок у структуруванні неорганічних в'яжучих. Якщо традиційно в матеріалознавстві враховують лише склад, концентрацію та заряд добавки, то для хіральних сполук критичним стає стереохімічний фактор: абсолютна конфігурація молекул суттєво змінює їхню взаємодію з хіральними сходинками кристалів, що ростуть. Відтак, хіральність постає як принципово новий параметр управління структуроутворенням гіпсових, вапняних та цементних систем, що й аналізується в даному огляді через призму теоретичних підходів та фізико-хімічних уявлень.

Стан проблеми. Систематичне дослідження впливу хіральних молекул на мінеральні фази, започатковане Луї Пастером у 1849 р. через розділення кристалів тартрату, сьогодні трансформувалося у вивчення стереоселективних взаємодій на атомному рівні. У системах гіпсових в'яжучих ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) встановлено, що попри ахіральність об'єму, окремі грані кристалів мають різну афінність до енантіомерів. Коді та Коді (1991) [1] пояснили це епітаксіальним механізмом «ключ–замок», а Гао та співавт. (2023, 2024) [2, 3] за допомогою АСМ-мікроскопії довели, що знак хіральної переваги (D чи L) визначається гідрофільністю або гідрофобністю бічного ланцюга амінокислот. Крім того, Смітс (2012) [8] та Кельнермайєр (2024) [9] показали, що хіральні добавки, як-от лимонна кислота, впливають на структуру вже на стадії аморфних наноскупчень-попередників.

У вапняних системах на основі кальциту ($CaCO_3$) енантіомери аспарагінової кислоти вибірково адсорбуються на дзеркально симетричних гранях [5]. Особливо виражена хіральна індукція властива вариту: за даними Хабракена (2017) [4], L- або D-ізомери амінокислот зумовлюють протилежне закручування тороїдальних надструктур через механізм «тілтингу

наночастинок». Це дозволяє спрямовано керувати мікроструктурою вапняного каменю під час карбонізації.

Для портландцементу ключовим є стереохімічний вплив виннокам'яної кислоти. Встановлено, що лише оптично активні форми тартрату (L або D) ефективно регулюють тужавіння, оскільки здатні утворювати подвійні хелатні містки з іонами Ca^{2+}, тоді як мезо-форма стереохімічно неефективна. Блек (2006) [10] та автори останніх досліджень (2025) [13] підтверджують, що тартрати й цитрати інгібують нуклеацію C-S-H фази та портландиту. Водночас наномеханічні властивості C-S-H, як показали Камалі та Гахреманінежад (2018) [11], залежать від хімії функціональних груп амінокислот, що відкриває шлях до стереохімічного дизайну цементного каменю.

Найбільш переконливі результати отримано для кальцій-фосфатних цементів (брушиту). Мусса (2020) [6] та Альшегхрі (2020) [7] продемонстрували, що лише L-(+)-тартрат суттєво підвищує міцність (на 62%) та тріщиностійкість (на 268%) цементу завдяки специфічному зв'язуванню з хіральними ступінцями [001, 101, 201]. На противагу цьому, у полімерних зв'язуючих (епоксидних смолах) хіральність мономера майже не впливає на макровластивості через втрату орієнтації в тривимірній сітці [12]. Проте потенціал природних хіральних полімерів, як-от лігносульфонату [14], у гібридних системах залишається перспективним полем для майбутніх досліджень.

Мета роботи – зробити огляд експериментальних фактів та запропонованих механізмів впливу хоральних добавок на процеси твердnення в'яжучих матеріалів. Проаналізувати перспективність застосування хіральних добавок як додаткового чинника керування структуроутворенням в'яжучих та засобу поліпшення їх властивостей. Оцінити можливості для математичного моделювання механізмів відповідного впливу.

Отримані результати. Аналіз літературних даних дозволяє виокремити кілька теоретичних концепцій, що пояснюють хіральний вплив на кристалізацію та структуроутворення в'яжучих.

Теорія епітаксіально-подібного відповідника (Epitaxial Matching Theory), запропонована Коді та Коді (1991) [1] для гіпсу, передбачає, що хіральна молекула адсорбується на певній кристалографічній грані, коли її просторова геометрія та розташування полярних груп комплементарні структурі поверхневих іонів мінералу. Для дзеркально пов'язаних граней одного кристала цей «ключ–замок» збіг можливий лише для одного з двох енантіомерів – оскільки самі грані є дзеркальними одна одної, а молекула є хіральною.

Переважна адсорбція одного з ізомерів несиметрично гальмує ріст, що призводить до хіральної модифікації звички кристала.

Теорія блокування ступінців (Step-Pinning Theory) базується на механізмі Кабрери–Верміл'є [17], що описує вплив адсорбованих домішок на просування ступінців кристалічного росту. Адсорбована молекула «закріплює» (pin) ступінець, зменшуючи ефективну довжину вільного сегмента. Хіральна версія цієї теорії передбачає, що L- та D-ізомери адсорбуються на різних стереохімічно специфічних кінк-сайтах і мають різні константи адсорбційної рівноваги, тому їхня блокуюча дія неоднакова. Саме цей механізм пояснює різний вплив D- та L-амінокислот на кінетику росту гіпсу (Gao et al., 2023) [2] та брушиту (Moussa et al., 2020) [6].

Теорія порушення симетрії нуклеації (Symmetry-Breaking Nucleation) передбачає, що введення хіральної добавки знижує бар'єр нуклеації для одного типу хіральності кристала і тим самим зміщує рівновагу між право- та ліворукими зародками. Цей механізм задокументований для ватериту (Habraken et al., 2017) [4], де хіральна амінокислота однозначно визначає знак спірального закручування тороїдальної надструктури.

Теорія хелатної геометрії (Chelation Geometry Theory) є специфічною для систем, де органічна молекула має кілька функціональних груп, здатних одночасно зв'язуватись з іонами кристалічної решітки. Для тартрату в гіпсовому та брушитовому цементах доведено, що тільки оптично активна форма може одночасно хелатувати два йони Ca^{2+} (або Ca^{2+} і HPO_4^{2-}) через карбоксильну й гідроксильну групи двох хіральних центрів. Мезо-форма геометрично нездатна утворити другий хелатний місток – і тому стереохімічно неефективна.

Теорія тілтингу наночастинок (Nanoparticle Tilting Theory), запропонована Хабракеном та співавторами (2017) [4], передбачає, що адсорбція хіральної амінокислоти на «материнській» наночастинці порушує ідеально орієнтоване нуклеаційно-приєднувальне зростання «дочірньої» наночастинки, що призводить до систематичного нахилу між ними. Багатократна ампліфікація цього нахилу через нанорівень призводить до макроскопічного хірального закручування надструктури. L- і D-ізомери адсорбуються в дзеркально симетричних орієнтаціях, що обумовлює протилежні знаки закручування.

Можливості створення попередньо оброблених стереоселективних матеріалів для хіральних добавок. Концепція попередньо оброблених «стереоселективних» матеріалів полягає у створенні мінеральних або полімерних поверхонь з апріорним хіральним характером, здатних розпізнавати L- та D-форми молекул і спрямовано використовувати їх для управління

кристалізацією. Це принципово новий напрямок, практично не вивчений для будівельних матеріалів, але добре розвинутий у біоміметиці та при синтезі кісткових замінників.

Перший підхід – хіральне молекулярне відбиток (chiral molecular imprinting). У процесі синтезу полімерного або мінерального матеріалу в реакційне середовище вводять молекулу-шаблон певної конфігурації, яка потім вилучається, залишаючи стереоселективні порожнини, комплементарні за геометрією до одного з двох енантіомерів субстрату. Технологія добре відпрацьована для синтезу хіральних сорбентів на основі SiO_2 та полімерних матриць і може бути перенесена на в'яжучі системи.

Другий підхід – хімічна модифікація поверхні мінерального в'яжучого хіральними агентами до змішування. Наприклад, обробка поверхні частинок β-напівгідрату або β-трикальційфосфату молекулами L-лізину або L-аспарагінової кислоти перед приготуванням цементного тіста могла б задати «хіральний контекст», в якому подальша кристалізація відбуватиметься стереоселективно і з більшою впорядкованістю.

Третій підхід – використання циклодекстринів як «хіральних середовищ». Циклодекстрини (ЦД) – циклічні олігосахариди з хіральною внутрішньою порожниною – здатні селективно включати хіральні молекули (ефект включення), підвищуючи локальну концентрацію одного з енантіомерів безпосередньо біля поверхні мінерального кристала. β-ЦД у системі портландцементу вже досліджувався, але ефекти стереоселективності не аналізувались.

Четвертий підхід – механохімічна або ультразвукова активація мінерального в'яжучого у присутності хіральних добавок. Механічна активація підвищує реакційну здатність поверхні й може сприяти адсорбції хіральних молекул на специфічних кристалографічних гранях ще до контакту з водою, «розмічаючи» поверхню перед гідратацією. Такий підхід технологічно реалістичний і заслуговує на систематичне вивчення.

Аналіз наявних даних дозволяє ідентифікувати найбільш перспективні системи «хіральна добавка – мінеральне в'яжуче», де управління стереохімією здатне дати реальний технологічний виграш. Узагальнення представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Перспективні системи хіральних добавок для управління властивостями в'яжучих

В'яжуче	Добавка	Механізм	Потенційне поліпшення	Рівень готов-ності (TRL*)
Брушит ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$)	L-(+)-виннокам'яна кислота	Блокування {010}-граней, зменшення кристалів	+62% σ_c; +268% K_IC [6]	4–5
Гіпс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	D- або L-амінокислоти (залежно від виду)	Стереоселективне блокування ступінців [001]	Ущільнення мікроструктури, управління морфологією	2–3
Кальцит / вапно	L- або D-Asp, Glu	Індукція хіральності зародків, контроль поліморфу	Поліпшення мікроструктури, водостійкості	2
Портландцемент (C-S-H)	L-(+)-тартрат vs рацемічний	Диференційне інгібування | C_3A та C_3S	Оптимізація реології та міцності	2–3
Брушит-колагенові цементи	L-(+)-виннокам'яна + колаген	Мультирівневий хіральний шаблон	Тріщиностійкість + біосумісність [7]	4

**TRL – Technology Readiness Level (рівень технологічної готовності за шкалою ЄС/NASA).*

Кальцій-фосфатний цемент (брушит) у поєднанні з L-(+)-тартратом є системою з найбільш яскраво продемонстрованим ефектом: поліпшення міцності на стиск на 62% та тріщиностійкості на 268% (Moussa et al., 2020) [6]. Ключовий чинник успіху – наявність хіральних ступінців брушиту [001, 101, 201] та стереохімічний «ключ–замок» відповідник з L-тартратом. D-тартрат не дає аналогічного ефекту. Для гіпсових в'яжучих задокументована стереоселективна взаємодія з амінокислотами [2, 3]: для 11 з 18 амінокислот ефективніший D-ізомер, для 7 – L-ізомер. Підбір хіральної добавки і її конфігурації дозволяє управляти розміром і морфологією кристалів дигідрату та, відповідно, механічними властивостями твердіючого гіпсового тіста. Вапняні системи демонструють чітку хіральну індукцію від L/D-Asp та L/D-Glu [4, 5], і оскільки кальцит є кінцевим продуктом карбонізації вапна, управління

хіральністю зародків через оптично чисті амінокислоти є цілком реалістичним і може вплинути на мікроструктуру і водостійкість вапняного каменю. Для портландського цементу задача ускладнена поліфазністю продуктів гідратації, проте тартрат вже використовується як ретардатор, і порівняльне дослідження L-, D-тартрату та рацемату є прямим подальшим кроком. Введення оптично чистих амінокислот як «нано-темплейтів» для C-S-H є перспективним, але потребує системних досліджень.

Висновки. Хіральність органічних добавок є самостійним і недостатньо дослідженим фактором управління структуроутворенням мінеральних та полімерних в'яжучих. Для кількох систем – гіпс, кальцит, ватерит, брушит, портландцемент – отримані переконливі докази того, що L- та D-форми однієї і тієї ж молекули відрізняються за характером взаємодії з кристалічними поверхнями і чинять різний вплив на кінетику кристалізації та механічні властивості. Ключові механізми хіральних ефектів включають: стереохімічний відповідник між молекулою і хіральними кінк-сайтами та ступінцями кристалів; диференціальну адсорбцію на дзеркально пов'язаних гранях; хелатну геометрію для молекул з кількома функціональними групами; ампліфікацію хіральності від нанорівня до макроструктури через «тілтинг» наночастинок. Найбільш перспективними для практичного впровадження є системи L-(+)-тартрат–брушит (доведений приріст міцності 62–268%), хіральні амінокислоти–гіпс і L/D-Asp/Glu–вапно. Напрямок «стереоселективних матеріалів» – хіральне молекулярне відбиток, поверхнева модифікація, циклодекстринові оболонки – є принципово новим і може відкрити шлях до в'яжучих із наперед заданою хіральністю мікроструктури.

Відомості про авторські вклади. Студенту *Медицькому А.В.* належить огляд літератури з наведеної проблематики.

Література | References

1. Cody A.M., Cody R.D. Chiral habit modifications of gypsum from epitaxial-like adsorption of stereospecific growth inhibitors. *Journal of Crystal Growth*, 1991, 113(3–4), 508–519. DOI: 10.1016/0022-0248(91)90086-K
2. Gao J., Li H., Sun Z., Song J., Liu Y., Jin C., Zhang Z., Ma J.-A., Jiang W. Selective Chiral Recognition between Amino Acids and Growing Gypsum Crystals. *Langmuir*, 2023, 39(36), 12707–12714. DOI: 10.1021/acs.langmuir.3c01429
3. Gao J. et al. Selective Chiral Interactions between Hydrophilic/Hydrophobic Amino Acids and Growing Gypsum Crystals. *Langmuir*, 2024. DOI: 10.1021/acs.langmuir.4c01644

4. Habraken W.J.E.M., Chung J., Weiner S., Falini G., Bhatt D.L., Peterlik H., Nudelman F. Chiral acidic amino acids induce chiral hierarchical structure in calcium carbonate. *Nature Communications*, 2017, 8, 15066. DOI: 10.1038/ncomms15066
5. Orme C.A., Noy A., Wierzbicki A., McBride M.T., Grantham M., Teng H.H., Dove P.M., De Yoreo J.J. Formation of chiral morphologies through selective binding of amino acids to calcite surface steps. *Nature*, 2001, 411, 775–779. DOI: 10.1038/35081034
6. Moussa H., Jiang W., Alsheghri A., Mansour A., El Hadad A., Pan H., Tang R., McKee M.D., Tamimi F., Song J. High strength brushite bioceramics obtained by selective regulation of crystal growth with chiral biomolecules. *Acta Biomaterialia*, 2020, 106, 351–359. DOI: 10.1016/j.actbio.2020.01.051
7. Alsheghri A., Moussa H., Song J., Tamimi F. Chiral Tartaric Acid Improves Fracture Toughness of Bioactive Brushite–Collagen Bone Cements. *ACS Applied Bio Materials*, 2020, 3(9), 6032–6040. DOI: 10.1021/acsabm.0c00555
8. Smeets P.J.M., Cho K.R., Kempen R.G.E., Sommerdijk N.A.J.M., De Yoreo J.J. Calcium carbonate nucleation driven by ion binding in a biomimetic matrix revealed by in situ electron microscopy. *Nature Materials*, 2015, 14, 394–399. DOI: 10.1038/nmat4193
9. Kellermeier M., Raiteri P., Berg J.K., Kempter A., Gale J.D., Gebauer D. Entropy drives calcium carbonate ion association. *ChemPhysChem*, 2016, 17(21), 3535–3541. DOI: 10.1002/cphc.201600653
10. Black L., Breen C., Yarwood J., Garbev K., Stemmermann P., Gasharova B. Structural Features of C-S-H(I) and Its Carbonation in Air – A Raman Spectroscopic Study. Part II: Carbonated Phases. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90(3), 908–917. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2006.01429.x
11. Kamali M., Ghahremaninezhad A. Effect of Biomolecules on the Nanostructure and Nanomechanical Property of Calcium-Silicate-Hydrate. *Scientific Reports*, 2018, 8, 9491. DOI: 10.1038/s41598-018-27746-x
12. Tang H., Gu F., Deng C., Lv M., Li L., Huang Y. Preparation of Chiral Epoxy Resins and the Optically Active Cured Products. *Advances in Polymer Technology*, 2023, 6612220. DOI: 10.1155/2023/6612220
13. Lothenbach B., Bernard E., Whittaker M., Provis J., Zajac M. Effect of organic admixtures on the hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 2022, 156, 106762. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106762
14. Ouyang X., Qiu X., Chen P. Physicochemical characterization of calcium lignosulfonate – a potentially useful water reducer. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, 282–283, 489–497. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.01.009
15. De Yoreo J.J., Vekilov P.G. Principles of Crystal Nucleation and Growth. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 54, 57–93. DOI: 10.2113/0540057
16. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Statistical Physics*. 3rd ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1980. 544 p.
17. Cabrera N., Vermilyea D.A. The growth of crystals from solution. In: *Growth and Perfection of Crystals* (R.H. Doremus, B.W. Roberts, D. Turnbull, eds.). Wiley, New York, 1958, pp. 393–410.

УДК 539.2:669.24

АДГЕЗІЙНА МІЦНІСТЬ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ ПЛІВОК, ЩО МІСТЯТЬ НАНОВУГЛЕЦЕВИЙ МАТЕРІАЛ

Строй Б. В.[1,a], **Титаренко В. В.**[1,b,*]

[1] *Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна*

[a] *Студент 2-го курсу;* [b] *Доцент кафедри фізики*

[*] *Автор для листування: tytarenko.valentina@gmail.com*

Анотація. *У роботі досліджено адгезійну міцність композиційних електролітичних нікелевих покриттів, що містять нановуглецевий матеріал. На основі аналізу механізмів адгезії, природи контактної взаємодії та ролі наночастинок ультрадисперсні алмази в процесах формування міжфазної області отримано аналітичний вираз для розрахунку адгезійної міцності композиційних покриттів. При цьому встановлено, що визначення точних значень ряду параметрів, які входять до запропонованої залежності, зокрема питомої енергії зв'язку, ефективного модуля пружності та характеристик міжфазного шару, є складним завданням. Розрахунок енергії взаємодії між атомами металевої матриці та частинками нановуглецевого матеріалу здійснювали з використанням методів теорії функціоналу густини. У результаті отримано теоретичні оцінки адгезійної міцності композиційних електроосаджених покриттів, що дозволяє встановити вплив нановуглецевих добавок на формування міжфазної структури та підвищення експлуатаційних характеристик покриттів.*

Ключові слова: *Енергія зв'язку; адгезійна міцність; модуль Юнга; композиційні електролітичні покриття; ультрадисперсний алмаз; імпульсний струм*.

ADHESIVE STRENGTH OF COMPOSITE ELECTROLYTIC FILMS CONTAINING NANOCARBON MATERIAL

Story B. V.[1,a], **Tytarenko V. V.**[1,b,*]

[1] *National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine*

[a] *2nd-year student;* [b] *Assoc. Prof. at the Dept. of Physics*

[*] *Corresponding author: tytarenko.valentina@gmail.com*

Abstract. *The work investigated the adhesion strength of composite electrolytic nickel coatings containing nanocarbon material. Based on the analysis of adhesion mechanisms, the nature of contact interaction and the role of ultradisperse diamond nanoparticles in the processes of interfacial region formation, an analytical expression was obtained for calculating the adhesion strength of composite coatings. It was found that determining the exact values of a number of parameters included in the proposed dependence, in particular the specific binding energy, the effective elastic*

modulus and the characteristics of the interfacial layer, is a difficult task. The calculation of the interaction energy between the atoms of the metal matrix, particles of nanocarbon material and the substrate was carried out using the methods of the density functional theory. As a result, theoretical estimates of the adhesion strength of composite electrodeposited coatings were obtained, which allows us to establish the influence of nanocarbon additives on the formation of the interfacial structure and improving the operational characteristics of the coatings.

Keywords: *bond energy; adhesion strength; Young's modulus; composite electrolytic coatings; ultradisperse diamond; pulsed current.*

Актуальність дослідження. Одним із головних критеріїв якості композиційних електролітичних покриттів (КЕП) є адгезія. Адгезійні властивості композиційних металевих покриттів значною мірою визначають їх експлуатаційні характеристики, зокрема зносостійкість, корозійну стійкість і довговічність. Дослідження процесів взаємодії на межі «покриття – підкладка» є важливим напрямом удосконалення технологій формування таких покриттів. Це завдання потребує комплексного підходу, який передбачає встановлення механізмів адгезії та визначення природи контактної взаємодії між атомами матричного металу та частинками нановуглецевого наповнювача [1, 2].

Стан проблеми. Для з’ясування механізмів адгезії та деформаційної поведінки систем «покриття–підкладка» досліджувались різні функціональні та багатошарові покриття, включаючи нітридні, полімерні та металеві системи, отримані різними методами нанесення [3]. Значну увагу приділяють також аналітичним і чисельним підходам до прогнозування адгезійної міцності з урахуванням сил міжатомної взаємодії, деформацій контактуючих тіл та енергетичних характеристик межі поділу [4].

Разом з тим, складність оцінювання адгезійної міцності пов’язана з відсутністю універсальних експериментальних методик. Існуючі методи дозволяють отримати лише оцінкові значення, які можуть суттєво відрізнятися залежно від умов випробувань і товщини покриття. Тому проблема адгезії залишається актуальною як для експериментальних, так і для теоретичних досліджень.

На сьогодні існує низка теорій, що описують адгезійні процеси [5, 6], включаючи молекулярно-динамічні підходи, атомістичне моделювання, методи на основі ударно-хвильових впливів та квантово-механічні розрахунки із застосуванням теорії функціонала густини. Ці підходи дозволяють враховувати електронну структуру матеріалів, поверхневу енергію та особливості міжатомної взаємодії, що особливо важливо для композиційних систем із нановуглецевими включеннями. Разом із тим, неможливість створення універсальної теорії адгезії пояснюється різною природою зв’язків у системах «метал–метал» та «метал–

вуглецевий матеріал». Тому застосування тієї чи іншої теоретичної моделі має враховувати конкретні умови формування покриттів і особливості міжфазної взаємодії.

Мета роботи. Запропоновати теоретичний підхід до визначення адгезійної міцності композиційних електроосаджених покриттів на основі металевої матриці, що містять нановуглецевий матеріал.

Метод розрахунку. Розрахунок енергії взаємодії атомів покриття та кристалічною ґраткою алмазу проводили методом теорії функціоналу густини (ТФГ), яка останнім часом є одним із найпопулярніших методів розрахунку електронної структури атомів, молекул, кластерів, твердих тіл тощо [7].

У рамках ТФГ повна енергія системи (W) виражається як функціонал від електронної густини:

$$W = U - \tfrac{1}{2}\sum_{i=1}^{N_{заповн}} \int \varphi_i^*(r)\nabla^2\varphi_i(r)dr - \sum_K Z_K \int \frac{\rho(r)}{|r-R_K|}dr + \frac{1}{2}\iint \frac{\rho(r)\rho(r')}{|r-r'|}drdr' + E_{XC}[\rho], \quad (1)$$

де Z_K та R_K – заряд та просторові координати нерухомого ядра з номером K відповідно і електронна густина.

$$\rho(r) = \sum_{i=1}^{N_{заповн}} |\varphi_i(r)|^2, \quad (2)$$

де $\varphi_i(r)$ – одноелектронна Кон-Шемівська (молекулярна) орбіталь. У згорнутому вигляді вираз (2) має вигляд:

$$W = U + T_S\{\varphi_i(r)\}_{i=1}^{N_{заповн}} + V_{ne}[\rho] + J[\rho] + E_{XC}[\rho]. \quad (3)$$

У правій частині рівняння (3) перший член U – потенційна енергія взаємодії ядер, другий – T_s, описує електронну кінетичну енергію, третій V_{ne} – тяжіння електронів до ядер, четвертий J – класичний внесок у енергію міжелектронного відштовхування та останній внесок E_{xc} – обмінно-кореляційний функціонал, що включає статичну електронну кореляцію.

Численні дослідження молекул і кластерів методом теорії функціонала густини (ТФГ) [8, 9] свідчать про високу точність результатів за умови коректного вибору обмінно-кореляційного функціонала. Одним із найоптимальніших функціоналів для моделювання структурних і термохімічних характеристик координаційних сполук металів є трипараметричний гібридний функціонал B3LYP.

Слід також зазначити, що при виконанні задач, які розглядаються у даній роботі, зокрема розрахунок енергій зв’язку, використовуються не абсолютні, а різницеві значення енергій, що ще більше підвищує надійність методу.

Для проведення розрахунків був використаний пакет програм GAUSSIAN 16 [10]. Температура при розрахунках вибиралась 295 К, тиск 10^5 Па.

Модуль Юнга визначали за деформацією вигину нікелевих пластин до та після нанесення композиційних покриттів, що містять частинки вуглецевого наноматеріалу:

$$E = \frac{FL^3}{4ab^3y}, \quad (4)$$

де F – зовнішня сила, під дією якої пластина викривляється; розміри пластини: L –довжина, b – товщина, a – ширина; y – стріла прогину.

Осадження проводили прямокутними імпульсами струму з частотою (f) 50 Гц, шпаруватістю імпульсів (Q) 50 та середньою густиною струму ($j_{сер}$) 100 А/м^2 з водного розчину електроліту наступного складу, в г/л: $NiSO_4$ $7H_2O$ – 300, H_3BO_3 – 30, Na_2SO_4 $10H_2O$ – 50; pH – 5. Порівняння проводили з композиційними покриттями, отриманими за допомогою постійного струму. У якості вуглецевого наноматеріалу використовували наночастинки ультрадисперсного алмазу (УДА), концентрація яких у водному розчині електроліту становила 2 г/л. У якості підкладки використовували фольгу міді, яка піддавались механічному та хімічному поліруванню. У якості розчину для хімічного полірування виступав 5 % розчин нітратної кислоти.

У роботі адгезійну міцність визначали методом Жаке [11]. Згідно з цим підходом, частину підкладки попередньо покривали тонким шаром струмопровідного лаку, що забезпечувало мінімальну адгезію покриття в цій зоні. Після осадження ділянка покриття, сформована на лаку, легко відокремлювалась і відгиналась під кутом 90°, після чого здійснювали відрив основного шару покриття. Міцність зчеплення оцінювали як відношення сили відриву (або зрізу) до площі контакту. Товщина покриття становила 10±0,2 мкм і визначалася розрахунково з урахуванням виходу металу за струмом.

Отримані результати. У теоретичному підході до визначення адгезійної міцності композиційних гальванічних покриттів необхідно враховувати високу швидкість зародкоутворення нормального росту гальванічних покриттів і, як наслідок, малий час заповнення підкладки атомами основного матеріалу покриття [12, 13]. Отже, зчеплення композиційних електролітичних покриттів здебільшого зумовлено взаємодією між атомами металевої матриці та частинками вуглецевого наноматеріалу. Для розрахунку теоретичної адгезійної міцності ($\sigma_{адг}$) було обрано вираз:

$$\sigma_{\text{адг}} = \sqrt{\frac{E_a E}{\pi h}}, \tag{5}$$

де E_a – енергія адгезії; E – модуль нормальної пружності матеріалу покриття; h – товщина покриття.

Застосування формули (5) представляє низку труднощів, і в першу чергу це складність визначення енергії адгезії. Експериментальні методи визначення енергії адгезії відсутні, а теоретичний розрахунок даної величини супроводжується великими припущеннями та наближеннями. Все це дає великий розкид у значеннях адгезійної міцності. Ми вважаємо, що для теоретичної оцінки адгезійної міцності КЕП у формулі (5) енергія адгезії може бути замінена питомою енергією зв'язку між атомами металевої матриці та частинками вуглецевого наноматеріалу:

$$\sigma_{\text{адг}} = \sqrt{\frac{W_{\text{пит.зв.}} E}{\pi h}}, \tag{6}$$

де $W_{\text{пит.зв.}} = \frac{\Delta W}{\pi r^2}$ – питома енергія зв'язку; ΔW – енергія зв'язку, що припадає на один атом; r – радіус атома металевої матриці. Остаточно формула для розрахунку теоретичного значення адгезійної міцності набуває вигляду:

$$\sigma_{\text{адг}} = \sqrt{\frac{\Delta W E}{\pi^2 r^2 h}}. \tag{7}$$

Під енергією зв'язку ми розумітимемо різницю між повною енергією з'єднання атом металу - комірка алмазу (W_{total}) та сумою енергій його складових частин (W_0):

$$\Delta W = W_{total} - W_0 \tag{8}$$

У розрахунках W_{total} моделювалась кристалічна ґратка підкладки з атомами матеріалу покриття. Нановуглецевий матеріал представлений кластерним фрагментом алмазної структури, що містить 14 атомів вуглецю та зберігає локальну симетрію точкової групи m3m (4/m −3 2/m). Кількість атомів, що враховуються в розрахунках, варіювала від 28 до 60 таким чином, щоб енергія взаємодії враховувалась, як мінімум, у межах трьох координаційних сфер.

У таблиці 1 наведені необхідні для розрахунку величини – теоретичне, отримане за формулою (8), та експериментальні, визначені методом вигину (формула (4)) та методом Жаке, а також значення адгезійної міцності.

З таблиці 1 видно, що зміна режиму осадження (шпаруватості слідування імпульсів струму) впливає на адгезійну міцність КЕП. Підвищення адгезійної

міцності КЕП зі зміною режиму імпульсного осадження узгоджується зі зростанням модуля Юнга покриття.

Таблиця 1

Адгезійна міцність композиційних електролітичних покриттів

Режим осадження	E_{exp}, ГПа	ΔW, еВ	h, мкм	$\sigma_{адг}$, МПа	
				Теор	Експ
Постійний струм	180	2,1	1	630	-
			10	200	150-220
Імпульсний струм: f=50Гц, Q=2	182		1	635	-
			10	200	170-250
Імпульсний струм: f=50Гц, Q=25	189		1	650	-
			10	205	190-270
Імпульсний струм: f=50Гц, Q=50	194		1	660	-
			10	210	200-300

Підвищення модуля Юнга КЕП пов’язане з особливостями формування структури під час осадження. Додавання нанорозмірних вуглецевих включень призводить до зміцнення металевої матриці за рахунок декількох механізмів. По-перше, вуглецеві наноструктури мають власний високий модуль пружності, тому їх рівномірний розподіл у матриці підвищує загальну жорсткість композиту. По-друге, на межах зерен та в околі дислокацій такі включення ефективно блокують рух дислокацій, що також сприяє зростанню модуля Юнга. По-третє, нановуглецеві включення блокують рост зерен, збільшуючи частку меж зерен, які перешкоджають деформації. Також, під час електроосадження за допомогою імпульсного струму формується аксіальна текстура росту плівок з великими кристалографічними індексами, що також підвищує модуль пружності завдяки збільшенню частки кристалітів, орієнтованих у напрямках із максимальною жорсткістю для металевої матриці.

Висновки.

1. Методом вигину нікелевих пластин до та після нанесення композиційних покриттів, що містять частинки вуглецевого наноматеріалу, визначено модуль Юнга КЕП.
2. Запропонований метод розрахунку значення адгезійної міцності композиційних електролітичних плівок, що базується на енергії взаємодії атомів металевої матриці з частинками вуглецевого наноматеріалу.

Література | References

1. Shuai X., Zhuo Z., Yanwen Z., Dongxu C., Kaice Z., Tong L., Yangtao Z., Aihuai W. Interface feature via key factor on adhesion of CrN multilayer and alloy substrate // Applied Surface Science. 2023. Vol. 630. 157492.
2. Panteleenko F. I., Karpets M. N., Belotserkovsky M. A., Sosnovsky A. V. Determination of adhesive and cohesive strength in metal coatings deposited by hypersonic metallization // Science & Technique. 2021. Vol. 20, No. 6. P. 459–464.
3. Ciavarella M., Joe J., Papangelo A., Barber J. R. The role of adhesion in contact mechanics // Journal of the Royal Society Interface. 2019. Vol. 16, No. 151.
4. Panteleenko F. I., Karpets M. N., Belotserkovsky M. A., Sosnovsky A. V. Determination of adhesive and cohesive strength in metal coatings deposited by hypersonic metallization // Science & Technique. 2021. Vol. 20, No. 6. P. 459–464.
5. González-Tortuero S., Garrido M. A., Rodríguez J. An adhesion study in Ni and Cu nanocontacts from a molecular dynamics perspective // European Journal of Mechanics - A/Solids. 2023. Vol. 99. 104942.
6. Roman T., Agerico Diño W., Nakanishi H., Kasai H., Miyako Y., Naritomi M. PPS-metal adhesion: a density functional theory-based study // Solid State Communications. 2004. Vol. 132, No. 6. P. 405–408.
7. Fatima, Liao,Y., Tolba S.A., Ruiz Pestana L.A, Xia W. Chapter One – Electronic structure and density functional theory. Ruiz Pestana L.A, Xia W. (Eds.) *Fundamentals of Multiscale Modeling of Structural Materials*, Elsevier, 2023. P. 3–35.
8. Mei G., Bhattacharya S., Yacout A. M. Adhesion of ZrN and Al_2O_3 coatings on U metal from first-principles // Applied Surface Science. 2019. Vol. 473. P. 121–126.
9. Jia Z., Zhao X., Zhang G., Kang Y., Xu H., Zhao Z. A comparable study of Fe/Cu interfaces by first-principles method: the surface energy, work of adhesion and electronic structures // Physica B: Condensed Matter. 2022. Vol. 646. 414348.
10. Yudhanto A., Li X., Tao R., Melentiev R., Lubineau G. Identifying adhesion characteristics of metal-polymer interfaces: Recent advances in the case of electroplated acrylonitrile butadiene styrene // Materials Today Communications. 2023. Vol. 35. P. 1–10.
11. Gaussian 16, Revision B.01 / M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, G. E. Scuseria, M. A. Robb, J. R. Cheeseman, G. Scalmani, V. Barone, G. A. Petersson, H. Nakatsuji, X. Li [та ін.]. – Wallingford, CT : Gaussian Inc., 2016.
12. Tytarenko V. V., Zabludovsky V. A., Shtapenko E. Ph., Tytarenko I. V. Kinetic regularities of the formation of composite electrolytic coatings containing ultradispersed diamond particles // Physics and Chemistry of Solid State. 2022. Vol. 23, No. 3. P. 461–467.
13. Shtapenko E. P., Zabludovsky V. O., Tytarenko V. V., Kraeva V. S., Afanasov A. M. Formation of layered structure in films of nickel at electrodeposition by a pulse current // Metallophysics and Advanced Technologies. 2019. Vol. 41, No. 1. P. 27-37.

УДК 669.715:539.2:539.4 :530.145

QUANTUM-MECHANICAL INSIGHT INTO SOLID-SOLUTION STRENGTHENING IN ALUMINUM–MAGNESIUM ALLOYS

Plyushchay I.[1,a,*], **Shlihtemayer Y.**[1,b], **Plyushchay O.**[2,3,c,d]

[1] *Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine;* [2] *Kyiv Academic University, Kyiv, Ukraine;* [3] *Institute for Metal Physics of the N.A.S. of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

[a] *Assoc. Prof. at the Faculty of Physics;* [b] *4th-year student;* [c] *Head of the Lab. for New Methods for Materials Analysis;* [d] *Senior Res. Scientist*

[*] *Corresponding author: inna.pl@knu.ua*

Abstracts. *This work presents the first-principles modeling of the defect subsystem in aluminum-magnesium alloys using density functional theory. The structural distortions caused by magnesium atoms in the aluminum lattice and their influence on mechanical properties were investigated. The change in the bulk modulus was calculated. The interaction between magnesium atoms and an edge dislocation was analyzed, which indicates the importance of considering electronic effects.*

Keywords: *aluminum-magnesium alloys, first-principles modeling, density functional theory, point defects, dislocations, solid solution strengthening*.

Introduction. Aluminum–magnesium (Al–Mg) alloys form a key class of lightweight structural materials for modern transport and energy technologies due to their low density, high specific strength, good corrosion resistance, and weldability, which directly supports weight reduction and energy efficiency in contemporary construction and engineering applications. At the macroscopic level, their strength is governed largely by solid-solution strengthening, where Mg atoms dissolved in the Al matrix create local lattice distortions that impede dislocation motion, yet the microscopic interaction between solute atoms and defects such as vacancies and dislocations remains insufficiently quantified for realistic alloy design [1-2]. The purpose of this study is to perform first-principles modeling of the defect subsystem in Al–Mg alloys using density functional theory in order to clarify how Mg-induced structural and electronic perturbations modify the bulk modulus and the interaction between Mg atoms and an edge dislocation, thereby providing a physics-based foundation for optimizing the mechanical performance of Al–Mg alloys in advanced structural applications.

Materials and Methods. The defect subsystem in aluminum–magnesium alloys was studied within the framework of density-functional theory using the ABINIT code [3], employing the generalized-gradient approximation to the exchange–correlation

functional in the Perdew–Burke–Ernzerhof form [4]. Supercell calculations were performed for face-centered cubic aluminum, where individual Al atoms were substituted by Mg to model isolated point defects and to analyze the resulting structural relaxations and changes of the bulk modulus under periodic boundary conditions. The core electrons were described by norm-conserving pseudopotentials, while the valence electrons were expanded in a plane-wave basis with an energy cutoff chosen to ensure full convergence of total energies and forces.

From the physical point of view, this approach treats the interacting electron–ion system on a quantum-mechanical level and directly relates the electronic charge redistribution around solute atoms and defects to the resulting elastic and strengthening effects in the alloy. Within the same first-principles framework, supercells containing an edge dislocation were constructed in fcc Al, and selected Al sites in the dislocation core were replaced by Mg, which made it possible to quantify the interaction between solute atoms and dislocation lines as a microscopic origin of solid-solution strengthening in Al–Mg alloys.

Results and Discussion. The first stage of the study focused on modeling a single substitutional point defect in bulk fcc aluminum by introducing one Mg atom into a 32-atom Al32Mg supercell, in order to quantify the local lattice distortions that underlie solid-solution strengthening. Analysis of pair correlation functions revealed that the distance to atoms in the first coordination shell around the Mg impurity increases by approximately 1.01%, while the second and third shells change by only −0.02% and +0.009%, respectively, and the average lattice parameter of the supercell increases by 0.0088%. Fig. 1 presents the histogram of interatomic distances for an Al atom belonging to the first coordination shell around the Mg impurity, clearly illustrating these local distortions.

To control the influence of periodic boundary conditions, supercells containing 32 (2×2×2), 48 (3×2×2), 64 (4×2×2), and 108 (3×3×3) atoms were examined, allowing the convergence of the first-shell distortion to a nearly constant value to be tracked. In the largest 108-atom supercell, the increase of the first-shell radius reaches about 1.4%, confirming that the chosen model is stable and that the obtained results are physically reliable rather than artifacts of a too small cell size.

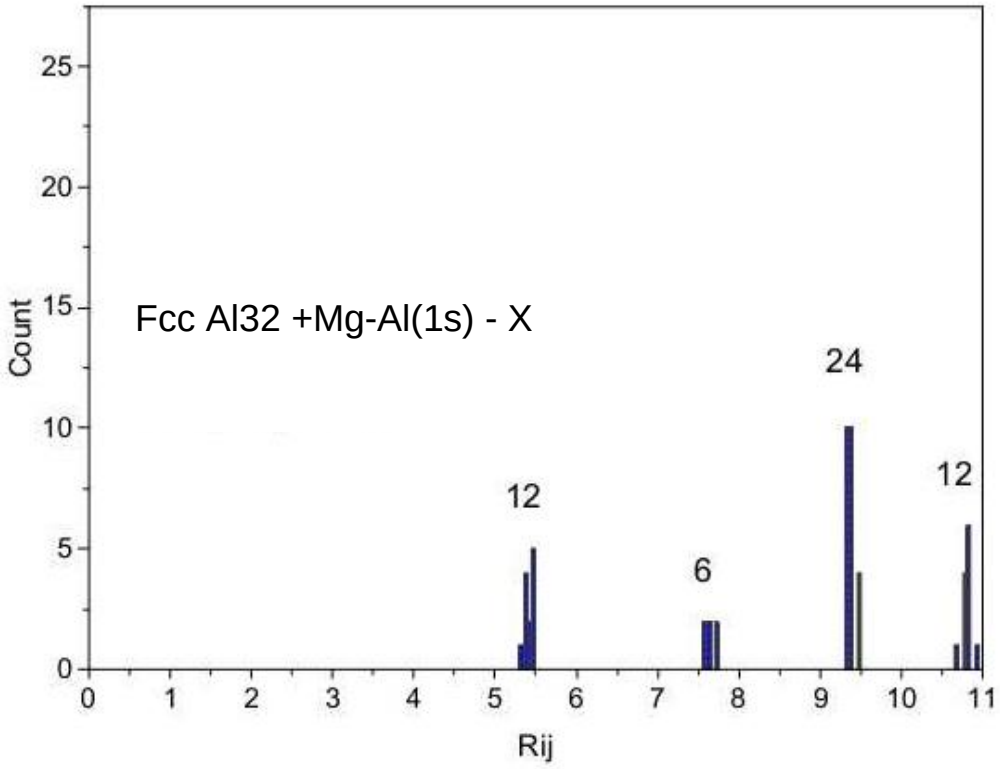


Fig. 1. Histograms of interatomic distances (Rij) for Mg–Al pairs and for an Al atom in the first coordination shell (Al(1s)) relative to all other atoms in the 32-atom supercell, illustrating the local structural distortions

Another important contribution to solid-solution strengthening is the modulus effect, i.e., the change of elastic properties upon alloying, which directly influences the macroscopic stiffness of the material. Using first-principles calculations, the bulk modulus B was determined from the pressure–volume dependence for uniformly compressed and expanded supercells, yielding B=78.17±0.37 GPa for pure Al, in very good agreement with the experimental value of 76 GPa, which validates the computational approach.

For the Al–Mg alloy with one Mg atom in a 32-atom supercell Al32Mg, the calculated bulk modulus increases to B=82.32±0.46 GPa, as obtained from the slope of the linear fit in the pressure–volume curve shown in Fig. 2. This increase in stiffness upon Mg alloying represents a second key factor, in addition to local lattice distortions, that contributes to the strengthening of Al–Mg alloys.

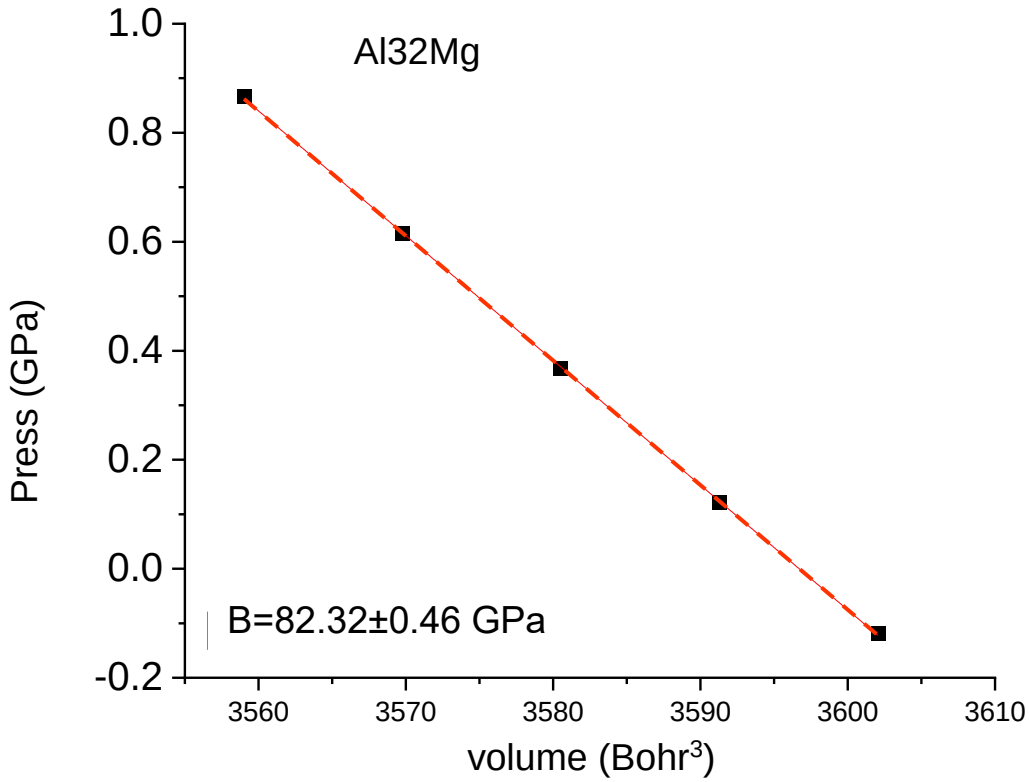


Fig. 2. Pressure–volume dependence for the Al32Mg supercell. The volume is given in Bohr^3 (the "Bohr" is the Bohr radius – the radius of the electron orbital closest to the nucleus of a hydrogen atom in the Niels Bohr's atomic model; 1 Bohr^3 ≈ 0.14818 Å^3)

The next step was to investigate the interaction between point defects and line defects, namely edge dislocations, since hindering dislocation motion is the primary microscopic mechanism of material strengthening. For this purpose, a supercell containing 87 atoms and an edge dislocation of the {100} type was constructed by removing a half-plane of atoms followed by full relaxation of atomic positions according to first-principles forces; the resulting configuration and the considered substitutional sites for Mg are shown in Fig. 3.

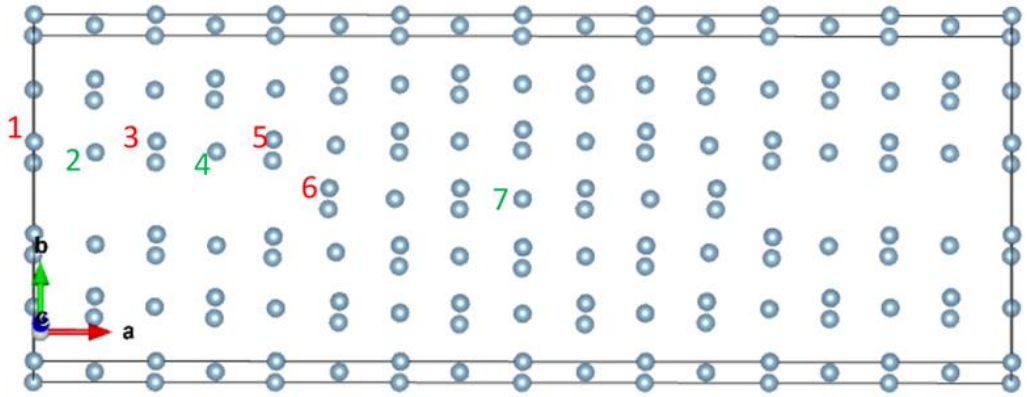


Fig. 3. Supercell (87 atoms) containing an edge dislocation with labeled substitutional positions for the magnesium atom. Green and red markers denote atomic sites with different z-coordinates

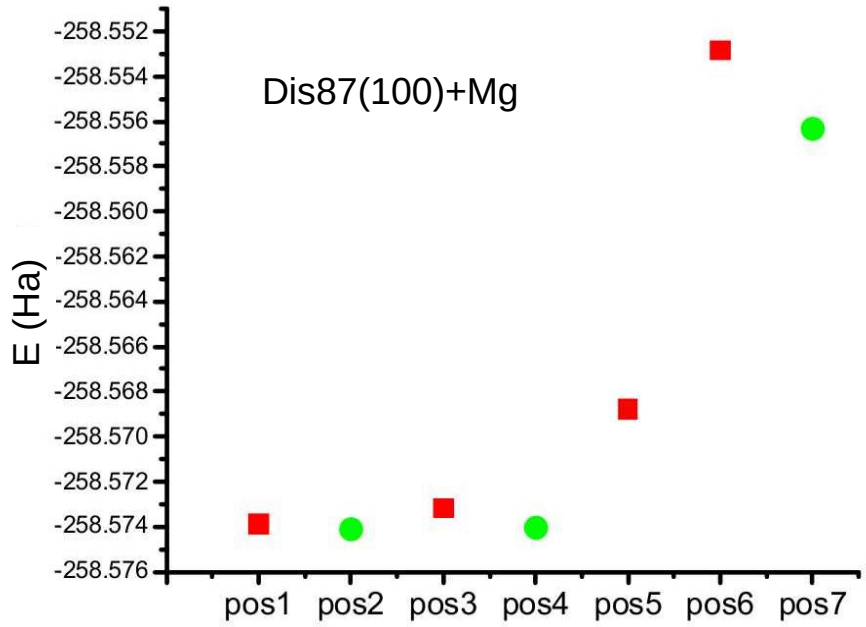


Fig. 4. Dependence of the total energy E on the position of a magnesium atom near the core of an edge dislocation in an 87-atom supercell (total energy E is given in Hartree; 1 Hartree is equal to twice the binding energy of an electron in a hydrogen atom; 1 Ha ≈ 27.2 eV)

The simulation results reveal that, contrary to the expectations of simple size-effect theory, the most stable configurations are obtained when the Mg atom is placed not directly at the dislocation core, but at positions located at a finite distance from it (positions 2 and 4 in Fig. 4). In these sites the solute–dislocation interaction corresponds to a bound Cottrell-like state, whereas the position predicted as optimal by the classical model (position 5) turns out to be noticeably less stable, as seen from the higher total energy in Fig. 4.

These findings indicate that a simple model based solely on size misfit and elastic stress fields is incomplete. First-principles calculations, which also account for the rearrangement of the electronic subsystem, show that electronic effects play a significant, and sometimes decisive, role in selecting energetically favorable sites for solute atoms, highlighting the importance of quantum-mechanical methods for understanding atomic-scale processes in materials.

Conclusion. The main findings of this work are that magnesium alloying of aluminum produces localized lattice distortions around substitutional Mg atoms, increases the bulk modulus of the alloy, and leads to specific energetically favorable binding sites for Mg near edge dislocations that are not fully captured by simple size-misfit models. Together, these effects provide a microscopic, quantum-mechanical picture of solid-solution strengthening in Al–Mg alloys, which complements and refines existing continuum and analytic theories of solute strengthening in aluminum alloys.

From a practical perspective, the demonstrated sensitivity of local structure, elastic response, and solute–dislocation interaction to Mg addition offers a physics-based guideline for tailoring the composition and microstructure of Al–Mg alloys used as lightweight structural materials in transport and construction, where an optimal balance between strength and ductility is required. The approach used here—combining first-principles modeling of defects with established strengthening concepts—can be extended to other alloying elements and alloy systems, supporting the rational design of advanced aluminum-based materials for modern engineering and scientific applications.

References

1. Leyson GPM, Curtin WA, Hector LG Jr, Woodward C. Quantitative prediction of solute strengthening in aluminium alloys. Nat. Mater. 2010. 9(9). P. 750–755.
2. Yasi JA, Hector LG Jr, Trinkle DR. First-principles identification of solute strengthening mechanisms in Al–X alloys. Acta Mater. 2013. 61(13). P. 5823–5833.
3. A software suite for calculations of the optical, mechanical, vibrational, and other observable properties of materials within quantum density functional theory: ABINIT project web-site. URL: https://www.abinit.org (last access 27.03.2026).
4. Perdew JP, Burke K, Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple. *Phys. Rev. Lett.,* 1996. 77(18). P. 3865–3868.

UDC 666.94:628.477

EFFECTS OF WASTE GLASS FROM OLD TV SCREENS ON THE PROPERTIES OF CEMENT-BASED BINDERS

Karolina Bekerė [1,a,*], **Jurgita Malaiškienė** [1,b]

[1] *Faculty of Civil Engineering, Lab. of Composite Materials, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania*

[a] *PhD student;* [b] *PhD, Chief Researcher*

[*] *Corresponding author: karolina.bekere@vilniustech.lt*

Abstract. *Annually, the quantity of television screens that are no longer operational increases, and one of their primary components is glass. The presence of metals and other chemical additives in this glass poses a significant challenge, as its distinct chemical composition precludes the application of the same recycling process employed for conventional bottle and packaging glass. However, after undergoing a grinding process that results in a powdery consistency comparable to that of cement, this glass can be reused in the production of cement-based materials due to its potential pozzolanic properties. The present study examined the effect of replacing 10%, 20%, and 30% of cement with ground glass from old television screens on key parameters such as binder density, ultrasound pulse velocity and compressive strength. The findings indicated a reduction in density due to glass particles morphology, chemical composition and less particle density compared to cement, reduction in compressive strength due to weaker interfacial transition zone and an increase in porosity of the binder structure. The chemical composition of this glass because low quantity of SiO_2 and quite high quantity of heavy metals supports the deterioration of physical and mechanical properties of binder.*

Keywords: *old TV screen's glass waste, cement-based binder, physical and mechanical properties.*

Introduction. Glass is utilized extensively in a variety of industrial applications, including packaging (e.g., bottles) and household products (e.g., old TV, LCD, LED), as well as optical components, liquid crystal displays, and photovoltaic solar modules. Due to the varying areas of application, there is significant variation in the properties and composition of these products [1]. As global glass production and consumption continue to increase, so too do glass waste streams [2–6]. However, the efficacy of recycling initiatives remains a subject of concern. In most countries, the rate of recycling typically does not exceed 35%, with a predominant emphasis on container glass and packaging [4,7].

The disposal of various household glass waste in landfills poses significant environmental risks due to the chemical composition and structure of glass [8], its non-biodegradable nature, and the technological challenges associated with recycling.

Consequently, it is imperative to identify solutions that would assist in the conservation of primary resources, the reduction of landfill occupancy, the mitigation of economic costs, and the simultaneous limitation of energy consumption [7,9,10].

A. M. Moncea et al. [11] investigated CRT glass (from panels, funnels, and colored and uncolored old TV screens) as a binder that replaced 20% and 40% of the mixture, together with slag and fly ash admixtures. Their studies showed that, in mixtures containing only CRT glass, the strength increased by 31% after 90 days of compression with 40% glass, compared to the control sample, while the strength remained similar with 20%. Mixtures with slag exhibited lower strength values than the control sample. They concluded that the strength values differed because replacing the active binding component (cement, glass, fly ash, or slag) reduces the setting time. However, due to their high fineness, CRT waste has a filling effect that can compensate the decrease in compressive strength caused by the binder's diluting effect.

Studies [12] show that replacing up to 10% or 20% of cement with LCD glass powder can alter the properties of concrete. For example, the compressive strength is lower in the early stages of hardening, with a drop of approximately 17% compared to control sample values. However, after 28 days, the situation changes — the compressive strength values in samples with LCD glass are about 6% higher than in control samples. This increase in strength is explained by densification of the microstructure during the pozzolanic reaction. The silicon dioxide containing particles of LCD glass react with portlandite (CH) to form more calcium silicate hydrates (CSH). The additional CSH in the later stages of hydration increases strength [13]. Regarding durability, literature indicates that LCD glass, with an average particle size of 10.98 – 37.01 μm, can significantly improve resistance to environmental factors and increase concrete's frost resistance and resistance to carbonation and sulfate corrosion [14]. Additionally, after 14 days in ASR tests, the samples of control mixture expanded by approximately 0.16%, whereas adding 20% glass reduced expansion to 0.05% [15]. Kim et al. [12] investigated whether the fineness of LCD glass powder affects concrete strength by comparing two fractions: LGP5 (FM = 4.46) and the finer LGP12 (FM = 2.73). To accelerate alkaline activation, the samples were dried at 80 – 120 °C. In the early drying stage (after 3 days), the compressive strength of the LGP12 with 15% and 20% glass mixtures decreased the most, by ~4.9% and ~8.2%, lower than the control, respectively. As drying continued in the later stages, all samples containing LCD glass had a higher compressive strength than the control sample.

The greatest increase in compressive strength was recorded after 28 days when 10% of the cement was replaced with LGP5 – the strength increased by ~15.7%. Similar results have been reported by other authors [15] – after replacing 5% of the

cement with glass, the compressive and flexural strength increased slightly after 7, 28, and 56 days. However, literature more often emphasizes that increasing the amount of LCD glass often leads to a decrease in early strength of cement composites [13,14].

This study aims to investigate the properties of old television screen glass (TV) and evaluate its influence on the hydration of cementitious binder, as well as the binder's physical and mechanical properties.

Materials and Methods. The chemical composition of main materials – TV glass waste and cement was determined using X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) with Rigaku Primus IV equipment (Tokyo, Japan), and the analysis data are presented in Table 1.

CEM I 42.5R Portland cement supplied by AB Akmenės cementas (Akmenė, Lithuania) was selected for the study, and TV glass waste obtained from UAB „Atliekų tvarkymo centras" (Vilnius, Lithuania) was also used.

Table 1

Raw materials chemical composition

Materials	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	MgO	CaO	Fe_2O_3	BaO	SO_3	CO_2	ZrO_2	SrO	PbO	Other
Cement	20	4.57	0.14	1.30	3.71	63.4	3.46	0.06	2.7	-	-	-	-	-
TV	53.1	2.3	6.37	7.85	0.31	0.93	0.14	8.62	-	5.83	1.5	7.7	3.98	8.43

A chemical composition analysis revealed that TV glass consists of 53.1% SiO_2**,** 8.6% BaO, 7.7% SrO, 7.9% K_2O, and 6.4% Na_2O. This glass also contains a relatively high amount of PbO, approximately 4%. The varied composition of TV glass indicates that it cannot be considered analogous to cementitious additives. However, due to its high SiO_2 content and probable amorphous structure, it is evident that finely ground TV glass can act as a pozzolanic additive. This reduces the CH content and forms additional CSH, improving the microstructure and long-term properties.

The particle size distribution of TV glass (Figure 1) was examined, and it was determined that the average particle size of TV glass is 7.24 μm. This determination was made using a CILAS 1090 laser diffraction particle size analyser (Odelzhausen, Germany).

The microstructure of the TV glass particles was examined by scanning electron microscopy (SEM). SEM analysis in secondary electron mode was performed using a JEOL JSM-7600F device. The images were obtained from the powders covered with gold. The following SEM analysis parameters were used: 10 kV voltage and 8–10 mm distance from the sample surface. As can be seen in Figure 2, the TV glass particles exhibit an irregular and angular morphology, with agglomerated fine particles adhering to the surfaces of larger particles.

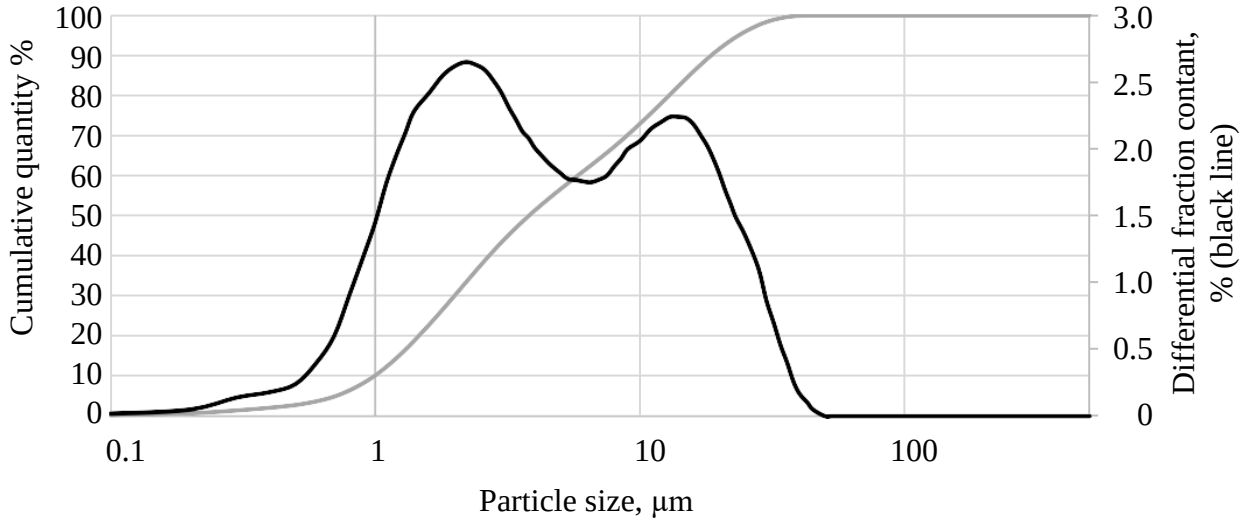


Fig. 1. TV glass particle distribution

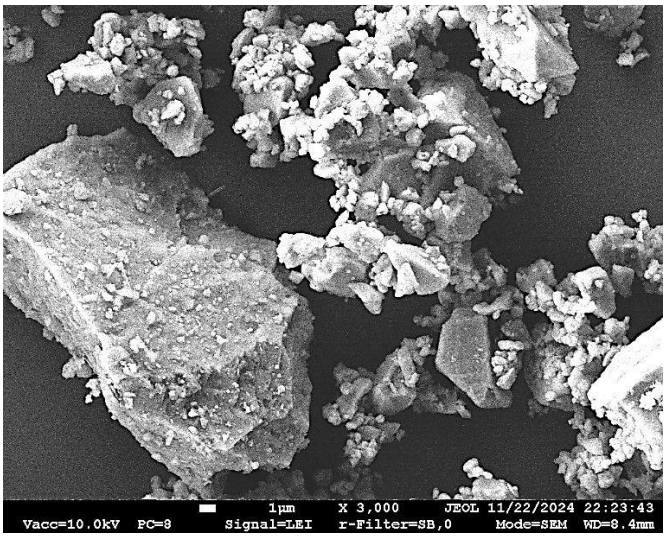


Fig. 2. Image of TV glass particles

TV glass waste mixtures were utilized as a partial substitute for cement, with four replacement levels: 0%, 10%, 20%, and 30%. The mixture preparation process was executed in two stages. Initially, the dry components were homogenized for 2 min using a Hobart-type mixer. Subsequently, the specified amount of water was added, and the mixing process was continued for an additional 3 min. The constant water-to- solid ratio (W/S = 0.35) was maintained for all compositions, ensuring that the water dose remained constant across the mixture.

The workability of the fresh mixture was assessed immediately after mixing in accordance with LST EN 12706 [16]. A metal cylinder (Ø 3 cm, h 5 cm) was utilized for the test, and workability was determined based on the slump-flow result. As demonstrated in Figure 3, an increase in the amount of TV is associated with a

consistent decrease in slump-flow, indicating a deterioration in the workability of the binder. This phenomenon can be attributed to the increased angular morphology of glass particles, which has been shown to enhance friction between particles and impede particle rearrangement within the fresh mixture [17]. Additionally, the augmented surface area necessitates an increased water requirement, while the amount of free water experiences a decline at a constant W/S ratio.

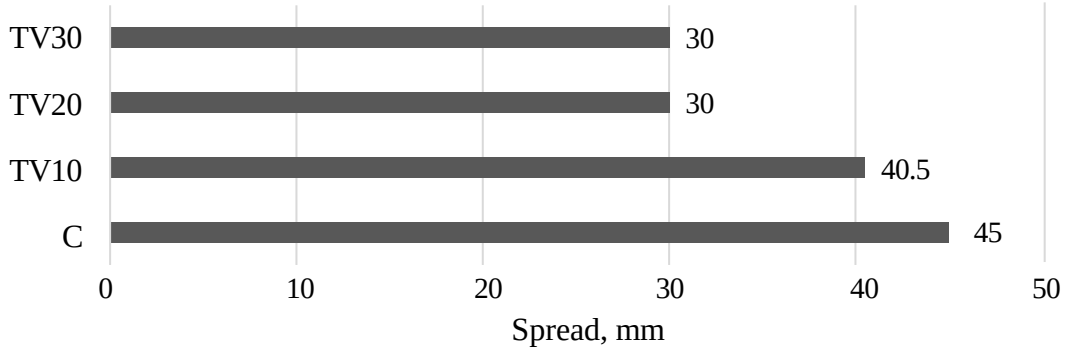


Fig. 3. The impact of TV glass on the mixtures spread

The density of the specimens was analysed after 7, 28, and 90 days by measuring specimen's dimensions (±0.01 mm) and their mass (±0.01 g). Subsequently, ultrasonic pulse velocity (UPV) was determined according to the established procedure delineated in the referenced documentation [18].

Compressive strength tests were executed using a Tinius Olsen H200 KU press (Tinius Olsen, Orlando, FL, USA) in accordance with the stipulations outlined in LST EN 196-1 [19]. For each mixture – three specimens were tested (40×40×40 mm).

Results and Discussion. It was observed that the TV glass reduced the density by up to 4% (Figure 4). Due to the irregular shape of crushed glass particles and the air voids formed between the glass particles and the cement, as well as the glass's lower particle density (2.8 g/cm³), the density of the resulting binder decreases after 7, 28, and 90 days.

An analysis of the ultrasonic pulse velocity (UPV) results (Figure 5) revealed that replacing 30% of the cement with TV glass decreases the UPV by 6.6% after 90 days compared to the control sample values. This decrease is associated with the shape of the glass particles and the formation of air voids in the cement paste. An atypical trend was also observed when analysing the dynamics of UPV in specimens with a 10% TV glass waste additive: a decrease in UPV values was recorded after 90 days of curing compared to the results after 28 days. This phenomenon may be associated with late microstructural degradation, likely caused by the alkali-silica reaction (ASR) onset or intense late shrinkage generating internal microcracks. Since this trend did not

manifest in the control specimen, it can be assumed that the 10% glass concentration specifically led to increased structural susceptibility to defect formation. In mixtures with higher amounts of 20% and 30% TV glass additives, however, this negative effect was potentially offset by more intense pozzolanic activity. The higher glass content ensured the formation of a denser CSH matrix that more effectively filled the pores and masked the potential effect of microcracks on the propagation speed of ultrasonic waves.

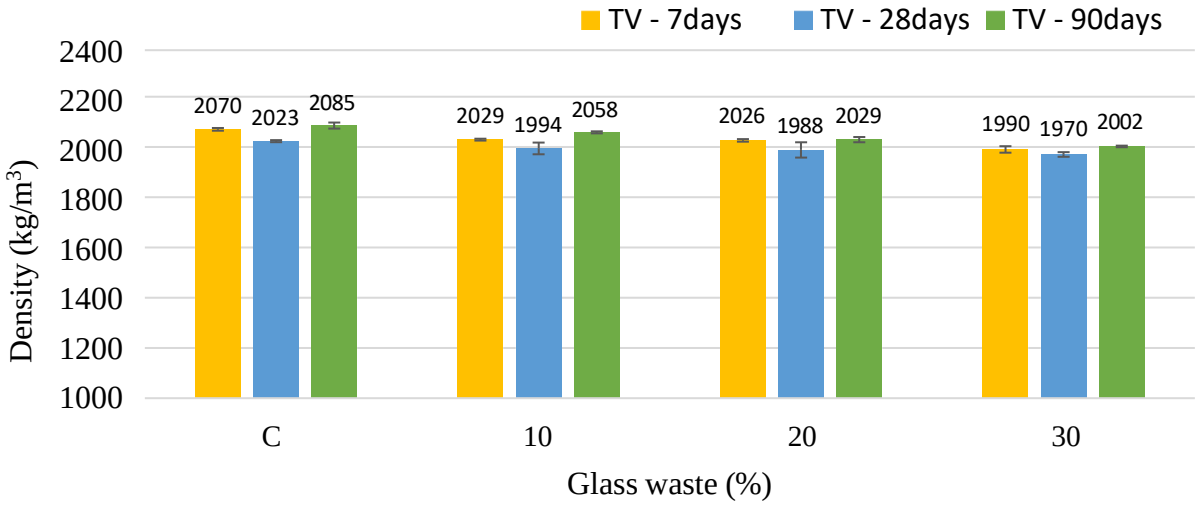


Fig. 4. Impact of TV glass on binder density after 7, 28, 90 days

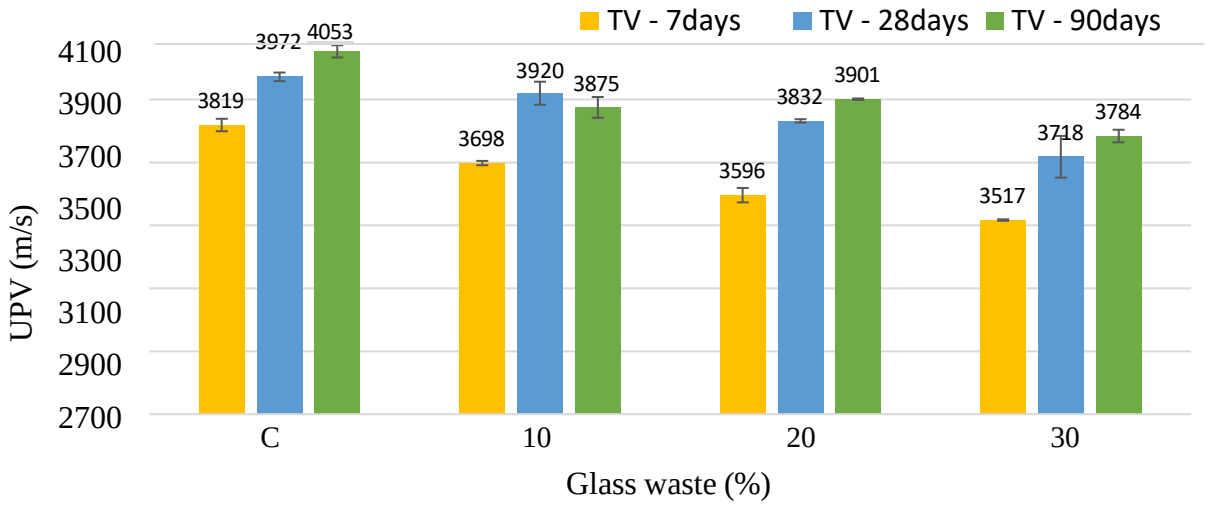


Fig. 5. Impact of TV glass on binder UPV after 7, 28, 90 days

However, the compressive strength test (Figure 6) does not reveal any distinct trends, as seen in the UPV graph. Compressive strength increased consistently throughout the entire 90-day curing period in all tested groups, confirming the positive pozzolanic activity of the glass waste. However, none of the compressive strengths

reached the values of the control specimens. Furthermore, a significant increase in strength is observed when comparing the results after 28 days of curing with the final 90-day results. The compressive strength of TV10% increased by 10.7%, and the largest relative increase in strength was recorded for TV20%, where the value rose by 15.4%. Even at the highest replacement level of 30%, a stable increase of 12.0% in strength is observed in the late stage. These results suggest that crushed glass acts as a reactive filler that forms an additional CSH matrix from portlandite in the long term, compensating for the initial strength deficit compared to the control specimen.

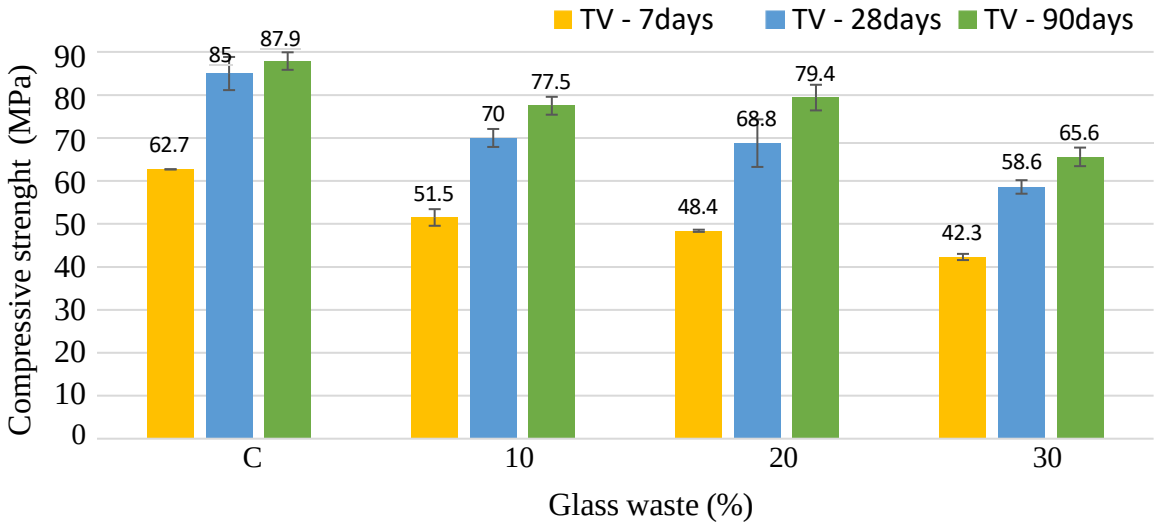


Fig. 6. Impact of TV glass on binder compressive strength after 7, 28, 90 days

Conclusions

- The angular morphology and lower density of the TV glass particles result in an overall decrease in binder density during all stages of curing. Ultrasonic pulse velocity measurements showed that, after 90 days, the values for the mixture with 30% TV glass were 6.6% lower than those of the control sample. This is directly linked to increased matrix porosity and the formation of air voids due to the particles' geometry.
- Atypical dynamics were identified in the 10% glass mixture – a 1.15% decrease in UPV was recorded after 90 days compared to the 28-day results. This indicates late microstructural degradation due to the onset of internal microcracks, likely caused by ASR or the mixture's shrinkage process, whereas higher glass concentrations compensated for this effect due to more intense pozzolanic activity and the formation of a denser CSH matrix.
- Although adding TV glass reduced compressive strength compared to the control specimen, a stable late stage increase in strength was observed in all groups. From 28 to 90 days, the compressive strength of all mixtures increased by 10.7% to

15.4%. This confirms that crushed TV glass acts as a reactive pozzolanic filler that strengthens the cement stone structure in the long term by promoting additional CSH phase synthesis.

- It is concluded that further research is needed on the binder of the cement-recycled glass mixture. Appropriate additives should be used to improve this binder's mechanical and physical properties.

References

1. Esquinas, A. R., Ledesma, E. F., Otero, R., Jiménez, J. R., & Fernández, J. M. (2018). Mechanical behaviour of self-compacting concrete made with non-conforming fly ash from coal-fired power plants. *Construction and Building Materials*, 182, 385-398. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.094
2. Wang, H. Y. (2009). A study of the effects of LCD glass sand on the properties of concrete. *Waste Management*, 29(1), 335-341. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.005
3. Prematilaka, K. K. W., Liyanapathirana, D. S., Leo, C. J., & Hu, P. (2024). Application of recycled waste glass to replace traditional quarried aggregates: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 86, 108846. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108846
4. Mohajerani, A., Vajna, J., Cheung, T. H. H., Kurmus, H., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2017). Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 156, 443-467. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005
5. Kazmi, D., Serati, M., Williams, D. J., Qasim, S., & Cheng, Y. P. (2021). The potential use of crushed waste glass as a sustainable alternative to natural and manufactured sand in geotechnical applications. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124762. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124762
6. Sobolev, K., Türker, P., Soboleva, S., & Iscioglu, G. (2007). Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations. Waste Management, 27(7), 971-976. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.014
7. Esmaeili, J., & AL-Mwanes, A. O. (2021). A review: Properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete incorporated with waste glass as a partial replacement for cement. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1958-1965. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.242
8. Yilbas, B. S., Ali, H., Khaled, M. M., Al-Aqeeli, N., Abu-Dheir, N., & Varanasi, K. K. (2015). Influence of dust and mud on the optical, chemical and mechanical properties of a pv protective glass. Scientific reports, 5(1), 15833. https://doi.org/10.1038/srep15833
9. Shayan A, Xu A. Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research, 34(1), 81-89.* https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00251-5
10. Dong, W., Li, W., & Tao, Z. (2021). A comprehensive review on performance of cementitious and geopolymeric concretes with recycled waste glass as powder, sand or cullet. Resources, *Conservation and Recycling*, 172, 105664. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105664

11. Moncea, A. M., Badanoiu, A., Georgescu, M., & Stoleriu, S. (2013). Cementitious composites with glass waste from recycling of cathode ray tubes. *Materials and structures*, 46(12), 2135-2144. https://doi:10.1617/s11527-013-0041-5.
12. Kim, S. K., Kang, S. T., Kim, J. K., & Jang, I. Y. (2017). Effects of particle size and cement replacement of LCD glass powder in concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017(1), 3928047. https://doi.org/10.1155/2017/3928047
13. Wang, H. Y. (2011). The effect of the proportion of thin film transistor–liquid crystal display (TFT–LCD) optical waste glass as a partial substitute for cement in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 25(2), 791-797. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.004
14. Yang, H. J., Usman, M., & Hanif, A. (2021). Suitability of liquid crystal display (LCD) glass waste as supplementary cementing material (SCM): Assessment based on strength, porosity, and durability. *Journal of Building Engineering*, 42, 102793. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102793
15. Raju, A. S., Anand, K. B., & Rakesh, P. (2021). Partial replacement of Ordinary Portland cement by LCD glass powder in concrete. Materials Today: Proceedings, 46, 5131-5137. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.117
16. Lithuanian Standards Board LST EN 12706:2000. *Bitumen and tar products – Terminology*. Vilnius: Lithuanian Standards Board; 2000.
17. Tan, K. H., & Du, H. (2013). Use of waste glass as sand in mortar: Part I–Fresh, mechanical and durability properties. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 109-117. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028
18. Malaiskiene, J., Costa, C., Baneviciene, V., Antonovic, V., & Vaiciene, M. (2021). The effect of nano SiO2 and spent fluid catalytic cracking catalyst on cement hydration and physical mechanical properties. *Construction and building materials*, 299, 124281. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124281
19. Lithuanian Standards Board LST EN 196-1:2016. *Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength*. Vilnius: Lithuanian Standards Board; 2016.

УДК 691

РЕГУЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІПСОГЛИНОЗЕМИСТИХ СИСТЕМ НАНОМОДИФІКАТОРАМИ РІЗНОЇ ПРИРОДИ

Гришко Г. М.[1,a,*], **Смолін Д. О.**[1,b], **Димківська А. Д.**[1,c], **Журба І. А.**[1,d]

[1] *Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро, Україна*

[a] *Канд. техн. наук, доцент;* [b] *Аспірант;* [c] *Студент 1-го курсу магістратури;* [d] *Студент 4-го курсу*

[*] *Автор для листування: hryshko.hanna@pdaba.edu.ua*

Анотація. *Традиційні гіпсові та глиноземисті в'яжучі мають низку недоліків, а саме низьку водостійкість; потенційну можливість фазових змін продуктів гідратації, що утворюються. Перспективним рішенням для подолання цих проблем є використання наномодифікаторів. Оптимальне співвідношення компонентів у системі глиноземистий цемент : гіпс становить 30%:70%, що забезпечує міцність на стиск понад 45 МПа на 28 добу. Обґрунтовано склад комплексної наномодифікації: вуглецеві нанотрубки (0,05-0,1%), суперпластифікатор Sika Viscocrete G2 (0,8%) та таурит (0,3-0,4%). Визначено, що введення наночастинок знижує водопотребу до В/Г = 0,48 та підвищує вміст хімічно зв'язаної води до 42 %. Отримані результати підтверджують високу ефективність використання модифікованих гіпсоглиноземистих в'яжучих.*

Ключові слова: *гіпсоглиноземистий цемент; наномодифікація; вуглецеві нанотрубки; етрингіт; іонозахисні властивості; суперпластифікатор; таурит*.

REGULATION OF THE PROPERTIES OF GYPSUM-ALUMINA SYSTEMS BY NANOMODIFIERS OF VARIOUS NATURE

Hryshko H. M.[1,a,*], **Smolin D. O.**[1,b], **Dymkivska A. D.**[1,c], **Zhurba I. A.**[1,d]

[1] *Ukrainian State University of Science and Technologies, PSACEA, Dnipro, Ukraine,*

[a] *Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.;* [b] *PhD student;* [c] *1st-year Master's student;;* [d] *4th-year student;*

[*] *Corresponding author: hryshko.hanna@pdaba.edu.ua*

Abstract. *Traditional gypsum and alumina binders have a number of disadvantages, namely low water resistance; potential phase changes of the hydration products formed. A promising solution to overcome these problems is the use of nanomodifiers. The optimal ratio of components in the system alumina cement: gypsum is 30 %:70%, which provides a compressive strength of more than 45 MPa at 28 days. The composition of the complex nanomodification is justified: carbon nanotubes (0.05-0.1 %), superplasticizer Sika Viscocrete G2 (0.8 %) and taurite (0.3-0.4 %). It was determined that the introduction of nanoparticles reduces water consumption to W/D = 0.48 and increases the*

content of chemically bound water to 42 %. The results obtained confirm the high efficiency of using modified gypsum-alumina binders.

Key words: *gypsum-alumina cement; nanomodification; carbon nanotubes; ettringite; ion-shielding properties; superplasticizer; taurite.*

Актуальність дослідження. Попри широкий асортимент будівельної продукції, галузь потребує ефективних матеріалах, здатних витримувати змінні умови експлуатації без втрати якості. Гіпсові композити є одними з найбільш перспективних у цьому напрямку через їхню економічну доцільність та масове застосування у складі сухих сумішей, оздоблювальних покриттів та листових матеріалів [1-5].

Перспективним вектором розвитку сучасного будівельного матеріалознавства є модифікація властивостей гіпсових в'яжучих для покращення їхніх експлуатаційних характеристик [6-7]. Зокрема, значний інтерес становить регулювання дисперсності матеріалу. Встановлено, що інтенсифікація помелу до досягнення питомої поверхні 2500–3000 $см^2/г$ дозволяє суттєво підвищити міцнісні показники гіпсового каменю. Попри прогнозоване зростання водопотреби такої системи, вища ступінь подрібнення забезпечує формування щільнішої структури виробу.

Окремим перспективним вектором досліджень є синтез гіпсоглиноземистих цементів (ГГЦ), які базуються на синергетичному поєднанні властивостей гіпсових в'яжучих ($CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$) та глиноземистих цементів системи (CaO-Al_2O_3) [7-11]. Особливістю даної системи є інтенсивна гідратація з активним формуванням етрингітової фази ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$). Такий механізм структуроутворення створює наукове підґрунтя для розробки швидкотверднучих композитів, а також спеціалізованих матеріалів з термо- та іонозахисними властивостями.

Попри значний потенціал, практичне впровадження таких систем обмежене низкою критичних чинників. Ключовою проблемою є термодинамічна нестабільність етрингітової фази, що провокує небажані об'ємні деформації та зниження довговічності композиту. У традиційних гіпсо-глиноземистих системах етрингіт, сформований на ранніх етапах гідратації, схильний до деструкції при коливаннях відносної вологості або термічному впливі, що призводить до порушення цілісності мікроструктури цементного каменю.

Актуальною науково-практичною задачею є розробка композиційного в'яжучого системи гіпс–глиноземистий цемент, яке б забезпечувало стабільну структуру каменю та регульовані терміни тужавлення у межах 25-45 хв.

Стан проблеми. Огляд поточної літератури свідчить, що більшість наукових пошуків зосереджена на емпіричному оцінюванні впливу ультра- та нанодисперсних добавок на механічні показники в'яжучих. При цьому результати характеризуються значною варіативністю, що зумовлено концентраційною залежністю: при вмісті модифікаторів у межах 0,024-0,15% приріст міцності варіюється від 30 % до 50 %. Найбільш поширеними об'єктами досліджень є ультрадисперсні мікрокремнезем, таурит, шунгіт, а також нанорозмірні вуглецеві трубки, фулерени, діоксиди кремнію й титану. Проте, попри значний обсяг даних щодо фізико-механічних ефектів, питання механізмів структуроутворення за присутності таких модифікаторів залишаються недостатньо висвітленими.

Мета роботи. Метою проведеного комплексу досліджень є встановлення закономірностей впливу наномодифікаторів різної фізико-хімічної природи на кінетику тужавлення, процеси гідратації та механізми структуроутворення гіпсоглиноземистих в'яжучих систем.

Метод розрахунку. Для реалізації цієї мети було проаналізовано особливості фазових перетворень вихідних компонентів, що дало змогу визначити характерні терміни тужавлення гіпсу та глиноземистого цементу як в ізольованих, так і в комбінованих системах. Встановлено, що варіація співвідношення в системі CaO-$Al2O_3$-SO_3 безпосередньо корелює з динамікою формування етрингітової фази та інтенсивністю набору міцності, що стало підґрунтям для пошуку оптимального балансу між швидкістю твердіння та структурною стабільністю каменю.

Окрему увагу приділено ролі наномодифікаторів у фізико-хімічних процесах гідратації, зокрема впливу вуглецевих нанотрубок (CNTs), наночастинок SiO_2, SiC та органічних добавок на кінетику кристалізації гідратних фаз. Паралельно було оцінено трансформацію технологічних властивостей розчинів, зокрема водопотреби та реологічних характеристик, при введенні пластифікаторів марок Sika Viscocrete G, MC Power Flow та STAHEPLAST. При цьому особливе значення мало наукове обґрунтування параметрів ультразвукового диспергування нанодобавок для забезпечення їх гомогенного розподілу в об'ємі матриці.

Комплексний аналіз мікроструктури за допомогою рентгенофазового методу та скануючої електронної мікроскопії (SEM) дозволив ідентифікувати морфологію цементного каменю та підтвердити ефект наноармування внутрішнього каркаса матеріалу. Порівняльна оцінка міцності при згині та стиску в інтервалі від 1 до 28 діб засвідчила переваги наномодифікованих систем

над традиційними аналогами. Підсумковим етапом роботи стало узагальнення отриманих даних для розробки практичних рекомендацій щодо технології промислового виробництва швидкотверднучих, іонозахисних та рентгенозахисних розчинів. Результати дослідження створили наукове підґрунтя для впровадження ефективних композиційних систем у сферах швидкомонтажного та спеціального будівництва, а також в адитивних технологіях.

Отримані результати. Експериментальна частина зосереджена на порівняльному аналізі трьох типів в'яжучих: гіпсового в'яжучого, глиноземистого цементу, а також їхньої композиційної суміші, модифікованої нанооб'єктами різного походження.

Експериментально встановлено показники термінів тужавлення базових гіпсових систем без введення функціональних домішок. Це дозволило отримати контрольні значення для подальшого порівняння з модифікованими складами. Далі було визначено терміни тужавлення композиційного в'яжучого (співвідношення ГЦ-40 до напівводного гіпсу – 70:30 відповідно). Для регулювання технологічних властивостей системи до складу вводили комплекс хімічних добавок: прискорювач Mapei Mapequick AFK 777 та суперпластифікатор Sika ViscoCrete G2. Результати наведені на рис. 1.

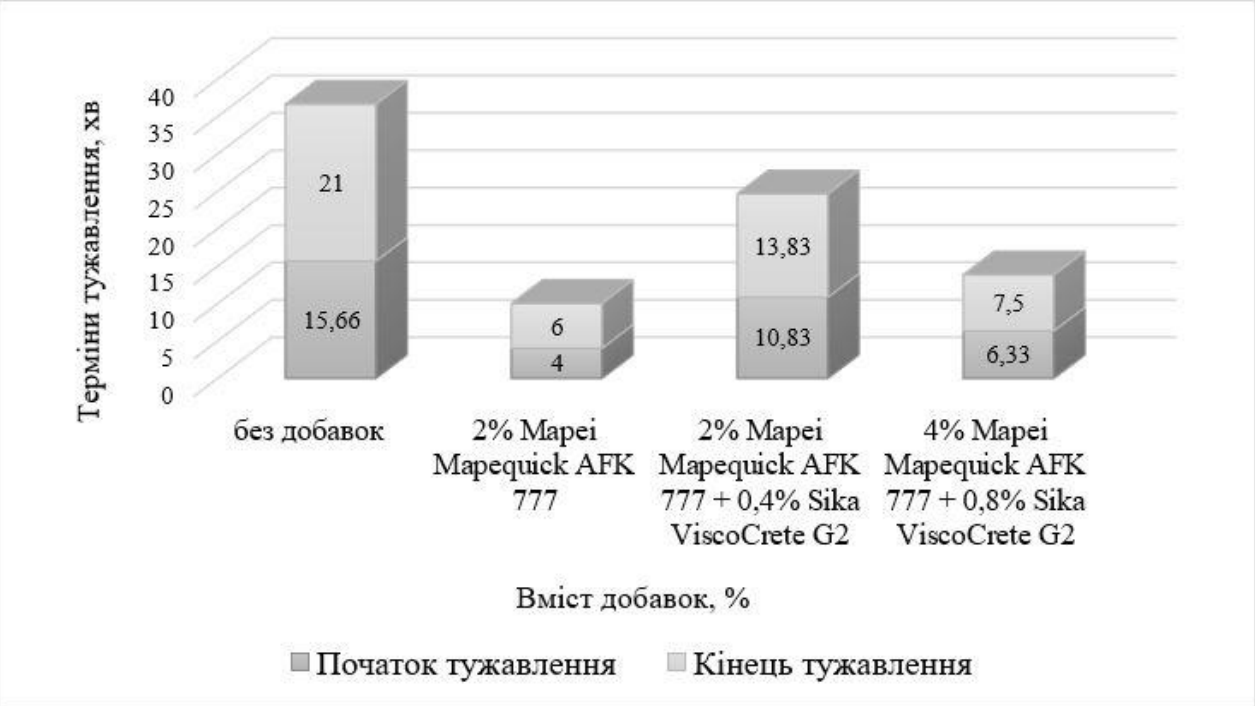


Рис. 1. Вплив вмісту добавок на терміни тужавлення гіпсового в'яжучого

Регулювання термінів тужавлення гіпсових систем традиційно здійснюється введенням розчинних солей (NaCl, KCl або Na_2SO_4), які інтенсифікують процес гідратації напівводного гіпсу. Для уповільнення тужавлення зазвичай застосовують добавки кератинової або вапняно-клейової природи [6]. Проте варто враховувати, що використання подібних модифікаторів за умови сталого водогіпсового відношення (В/Г) переважно спричиняє зниження міцнісних показників готових виробів. Альтернативним підходом є застосування поверхнево-активних речовин (ПАР), які дозволяють мінімізувати негативний вплив за рахунок водоредукувального ефекту та збереження необхідної рухливості суміші.

У роботі також були використані глиноземисті цементи марок ГЦ-40 та ГЦ-50, що відповідають нормативним вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Мінералогічний склад цементу представлений переважно алюмінатами кальцію (CA, CA_2, $C_{12}A_7$), наявність яких зумовлює інтенсивну кінетику тужавлення та прискорений набір ранньої міцності.

Механізм формування міцності в першу добу твердіння базується на реакціях гідратації з утворенням низькоосновних гідроалюмінатів кальцію (C_2AH_8, C_4AH_{13}, C_4AH_{10}, CAH_{10}). За умови присутності сульфатів кальцію в системі спостерігається додаткове формування етрингіту ($C_6AS_3H_{32}$), що забезпечує компенсацію усадки та суттєве підвищення показників початкової міцності каменю.

Синтез композиційного в’яжучого здійснювали шляхом сумісного помелу гіпсового в’яжучого марки Г-5 та глиноземистого цементу ГЦ-40 у масовому співвідношенні 2,5 : 1,0 (відповідно 70 % та 30 %). Обрана пропорція забезпечує оптимальний баланс у системі $CaO-Al_2O_3-SO_3$ для інтенсивного утворення етрингіту. Згідно з дослідженнями Гришко Г.М. (2025) , саме таке співвідношення компонентів сприяє формуванню стабільної етрингітової структури з максимальним показником хімічно зв’язаної води (до 42 %). Технічні характеристики отриманого композиту наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики композиту

Показник	Значення
Початок тужавлення	30-40 хв
Кінець тужавлення	60-80 хв
Межа міцності при стиску (1 доба)	20-25 МПа
Межа міцності при стиску (28 діб)	> 45 МПа

Для інтенсифікації процесів структуроутворення та стабілізації гідратних фаз застосовували нанодобавки органічної та неорганічної природи:

– Вуглецеві нанотрубки (CNTs) діаметром 5-25 нм із питомою поверхнею 80-120 м2/г. Введення здійснювали у формі суспензії, попередньо обробленої ультразвуком (частота 15-20 кГц) у присутності пластифікатора. Функціональна роль нанотрубок полягає у наноармуванні етрингітової матриці та зниженні швидкості її деструкції під час дегідратації.

– Таурит – полімерна аміносульфонова сполука, що виконує роль комплексоутворювача. У дозуванні 0,3-0,5% від маси в'яжучого добавка стабілізує гідратні фази, підвищує пластичність системи та знижує її водопотребу.

– Sika ViscoCrete G – суперпластифікатор на основі полікарбоксилатних ефірів. Забезпечує зменшення водопотреби до 18,7% та сприяє гомогенному розподілу наночастинок.

– MC-PowerFlow 2695 дозволяє знизити водогіпсове відношення на 14%, оптимізуючи структуру порового простору.

– STAHEPLAST 156 використовується для пролонгації початку тужавлення (до 37 хв), що покращує технологічну життєздатність суміші під час формування.

– SiC-nano та SiO2-nano – неорганічні нанопорошки із середнім розміром частинок 20-40 нм у концентрації 0,5-1% від маси в'яжучого інтенсифікує процес кристалізації гідратів. Завдяки ущільненню мікроструктури цементу це забезпечує приріст показників ранньої міцності на 20-25%.

Результати експериментальних досліджень підтвердили, що базове гіпсове в'яжуче відзначається високою інтенсивністю схвалювання та стислим періодом твердіння. Початок тужавлення зафіксовано в інтервалі 6-8 хв, а повне завершення процесу – через 12-15 хв після затворення водою. Така кінетика зумовлена швидкою гідратацією напівводного сульфату кальцію ($CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$) з його переходом у двоводну форму ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), що супроводжується масовим формуванням кристалізаційних контактів та ростом голчастих агрегатів гіпсового каменю. Попри інтенсивний початковий набір структури, механічні показники матеріалу залишаються обмеженими: межа міцності при стиску через 2 години становить 6-8 МПа, при згині – 2-3 МПа. Характерно, що подальше витримування зразків не призводить до суттєвого зростання міцнісних характеристик. Це пояснюється формуванням пухкої мікроструктури з розвиненою мережею капілярних пор, що є типовим для монофазних гіпсових систем.

У порівнянні з гіпсовими в’яжучими, глиноземистий цемент характеризується суттєво вищими показниками водостійкості, жаротривалості та механічної міцності. Проте суттєвим недоліком є схильність до фазових трансформацій у процесі експлуатації (зокрема, перехід метастабільних гідроалюмінатів у стабільний кубічний гідроалюмінат C_3AH_6), що супроводжується зростанням пористості, усадковими деформаціями та частковою втратою несучої здатності каменю.

Ефективним способом нівелювання цих негативних явищ є введення до системи сульфату кальцію. Це дозволяє переспрямувати кінетику гідратації в бік переважного формування етрингіту ($C_6AS_3H_{32}$), який зберігає стабільність в умовах надмірного зволоження. Таким чином, розробка композиційного гіпсоглиноземистого цементу (ГГЦ) є перспективним науково-технічним напрямом, оскільки дозволяє синергетично поєднати позитивні властивості обох в’яжучих компонентів.

Найвищі експлуатаційні показники зафіксовано для композиційного в’яжучого із масовим співвідношенням ГЦ: Г = 1 : 2,5 (30% : 70%). Технологічні параметри тужавлення такої системи (початок – 30-40 хв, кінець – 60-80 хв) знаходяться в оптимальному інтервалі, що забезпечує достатню життєздатність суміші для проведення формувальних робіт.

Згідно з даними Гришко Г.М. (2025) [5, 11], міцність на стиск розробленого складу становить 20-25 МПа через 1 добу та зростає до 45-50 МПа на 28-му добу твердіння. Це на 35-40 % перевищує показники немодифікованого гіпсового каменю. Мікроструктурні дослідження підтвердили формування гетерофазної матриці, у якій кристали етрингіту виконують функцію мікроармувального каркаса. При цьому гель $Al(OH)_3$, що заповнює міжкристалічний простір, відіграє роль пластичної фази, яка нівелює внутрішні напруження та запобігає утворенню мікротріщин.

Встановлено, що використання суперпластифікатора на полікарбоксилатній основі Sika Viscocrete G2 забезпечує максимальний водоредукувальний ефект (зниження В/Г на 18,7 %). Добавка MC Power Flow 2695 виявила високу ефективність у регулюванні мікропористості, забезпечуючи рівномірне гідратування компонентів при зниженні водопотреби на 14,2 %. Водночас застосування STAHEPLAST 156 дозволяє суттєво подовжити інтервал тужавлення (початок – 37:31 хв), що є критично важливим для забезпечення необхідної технологічної витримки при виготовленні великогабаритних виробів.

Висновки. У результаті проведеного аналізу базових в'яжучих систем встановлено, що чисте гіпсове в'яжуче характеризується інтенсивною кінетикою тужавлення (6-15 хв) та низькими міцнісними показниками, що обмежує його конструкційне застосування. Глиноземистий цемент забезпечує високу ранню міцність, проте схильність до метастабільних фазових перетворень у процесі експлуатації негативно впливає на об'ємну стабільність каменю та призводить до зростання пористості. Оптимізація складу композиційного в'яжучого показала, що бінарна система гіпсоглиноземистого цементу (ГГЦ) при масовому співвідношенні ГЦ : Г = 1 : 2,5 демонструє найбільш раціональні технологічні властивості. Терміни тужавлення такої системи становлять 30-80 хв, а показники механічної міцності на стиск після 28 діб твердіння перевищують 45 МПа, що свідчить про ефективну взаємодію компонентів.

Обґрунтовано склад комплексної системи модифікації, який включає вуглецеві нанотрубки (0,05-0,1 %) як наноармувальний елемент, суперпластифікатор Sika Viscocrete G (0,8 %) для забезпечення гомогенного диспергування та таурит (0,3-0,4 %) як стабілізатор гідратних фаз. Застосування даного комплексу дозволило знизити водогіпсове відношення до 0,48, збільшити частку хімічно зв'язаної води до 42 % та підвищити коефіцієнт ущільнення структури на 25-28 % порівняно з контрольним складом.

Література

1. Azeez, A.B.; Mohammed, K.S.; Abdullah, M.M.A.B.; Hussin, K.; Sandu, A.V.; Razak, R.A. (2013). The effect of various waste materials' contents on the attenuation level of antiradiation shielding concrete. Materials, 6 (10), 4836-4846. https://doi.org/10.3390/ma6104836
2. Русин Б. Г., Саницький М. А., Гоголь М. М., Кропивницький Т. С. (2023). Вплив ультрадисперсних мінеральних добавок на властивості низьковуглецевих високофункціональних бетонів. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*, 4(104), 66-75. https://doi.org/10.31713/vt420236
3. Sanytsky, M., Kropyvnytska, T., Heviuk, I., Sikora, P., Braichenko, S. (2021). Development of rapid-hardening ultra-high strength cementitious composites using superzeolite and N-C-S-H-PCE alkaline nanomodifier. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(6), 113. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242813
4. Sanytsky, M., Kropyvnytska, T., Vakhula, O., Bobetsky, Y. (2023, September). Nanomodified Ultra High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites with Enhanced Operational Characteristics. In International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice–Rzeszów (pp. 362-371). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_36

5. Derevianko, V., Hryshko, H., Smolin, D., Zhurba, I., and Dubov, T. (2024). Development of binders based on the $CaO–Fe_2O_3$ system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(6 (130), 49–58. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309128
6. Tuinukuafe, A., Noor, L., Ideker, J. H., Isgor, O. B. (2022). Factors Influencing the Electrical Properties of Ettringite Binders as Repair Materials. MATEC Web of Conferences, 364, 02005. https://doi.org/10.1051/matecconf/202236402005.
7. Cao, W., Zhu, H. (2024). A Study on the Application Performance of High-Aspect-Ratio Nano-Ettringite in Photocurable Resin Composites. Materials, 17(14), 3492. https://doi.org/10.3390/ma17143492
8. Fang, Z., Zhang, S., Qi, W., Fan, Y., Shah, S. P., Zheng, J. (2024). Study on the Binding Behavior of Chloride Ion and Ettringite in Nano-Metakaolin Cement by Seawater Mixing and Curing Temperatures. Materials, 17(16), 3943. https://doi.org/10.3390/ma17163943
9. Zhang, G., Zhang, B., Hao, Y., Pang, Q., Tian, L., Ding, R., Ma, L., Wang, H. (2024). Effects of Lime Powder on the Properties of Portland Cement–Sulphoaluminate Cement Composite System at Low Temperature. Materials, 17 (15), 3658. https://doi.org/10.3390/ma17153658
10. Толмачев, С. Н., Беліченко, Е. А. (2017). Перспективи використання наночасток в бетонах транспортного призначення. *Будівельні матеріали та вироби*, (1-2), 38-41. http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii_2017_1-2_16
11. Hryshko, H., Derevianko, V., Vatazhyshyn, O., Dubov, T. (2024). Researching the influence of the CaO/Al_2O_3 ratio on ettringite formation and obtaining the structure of a cement paste with special properties. E3S Web of Conferences, 534, 01005. International Scientific and Practical Conference Innovations in Construction and Smart Building Technologies for Comfortable, Energy Efficient and Sustainable Lifestyle (ICSBT 2024). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453401005

References

1. Azeez, A.B.; Mohammed, K.S.; Abdullah, M.M.A.B.; Hussin, K.; Sandu, A.V.; Razak, R.A. (2013). The effect of various waste materials' contents on the attenuation level of antiradiation shielding concrete. Materials, 6 (10), 4836-4846. https://doi.org/10.3390/ma6104836
2. Rusyn B. G., Sanytskyi M. A., Gogol M. M., Kropyvnytskyi T. S. (2023). Vplyv ultradyspersnykh mineralnykh dobavok na vlastyvosti nyzkovuhletsevykh vysokofunktsionalnykh betoniv [The influence of ultradisperse mineral additives on the properties of low-carbon high-performance concretes]. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*, 4(104), 66-75. https://doi.org/10.31713/vt420236 (in Ukrainian).
3. Sanytsky, M., Kropyvnytska, T., Heviuk, I., Sikora, P., Braichenko, S. (2021). Development of rapid-hardening ultra-high strength cementitious composites using superzeolite and N-C-S-H-PCE alkaline nanomodifier. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(6), 113. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242813
4. Sanytsky, M., Kropyvnytska, T., Vakhula, O., Bobetsky, Y. (2023, September). Nanomodified Ultra High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites with Enhanced Operational Characteristics. In International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice–Rzeszów (pp. 362-371). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_36

5. Derevianko, V., Hryshko, H., Smolin, D., Zhurba, I., and Dubov, T. (2024). Development of binders based on the $CaO–Fe_2O_3$ system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(6 (130), 49–58. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309128
6. Tuinukuafe, A., Noor, L., Ideker, J. H., Isgor, O. B. (2022). Factors Influencing the Electrical Properties of Ettringite Binders as Repair Materials. MATEC Web of Conferences, 364, 02005. https://doi.org/10.1051/matecconf/202236402005.
7. Cao, W., Zhu, H. (2024). A Study on the Application Performance of High-Aspect-Ratio Nano-Ettringite in Photocurable Resin Composites. Materials, 17(14), 3492. https://doi.org/10.3390/ma17143492
8. Fang, Z., Zhang, S., Qi, W., Fan, Y., Shah, S. P., Zheng, J. (2024). Study on the Binding Behavior of Chloride Ion and Ettringite in Nano-Metakaolin Cement by Seawater Mixing and Curing Temperatures. Materials, 17(16), 3943. https://doi.org/10.3390/ma17163943
9. Zhang, G., Zhang, B., Hao, Y., Pang, Q., Tian, L., Ding, R., Ma, L., Wang, H. (2024). Effects of Lime Powder on the Properties of Portland Cement–Sulphoaluminate Cement Composite System at Low Temperature. Materials, 17 (15), 3658. https://doi.org/10.3390/ma17153658
10. Tolmachev, S. N., Belichenko, E. A. (2017). Perspektyvy vykorystannya nanochastok v betonakh transportnoho pryznachennya [Prospects for the use of nanoparticles in concrete for transportation purposes.]. *Budivelni materialy ta vyroby [Building materials and products]* (1-2), 38-41. http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii_2017_1-2_16
11. Hryshko, H., Derevianko, V., Vatazhyshyn, O., Dubov, T. (2024). Researching the influence of the CaO/Al_2O_3 ratio on ettringite formation and obtaining the structure of a cement paste with special properties. E3S Web of Conferences, 534, 01005. International Scientific and Practical Conference Innovations in Construction and Smart Building Technologies for Comfortable, Energy Efficient and Sustainable Lifestyle (ICSBT 2024). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453401005

УДК 691.328.1:539.4:614.8

ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФІБРОБЕТОНУ ДЛЯ КОНСТРУКЦІЙ МОБІЛЬНИХ УКРИТТІВ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ: ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ

Мінаков О. І.[1,a*], **Кровяков С. О.**[1,b]

[1] *Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна*

[2]*Аспірант кафедри виробництва будівельних виробів та конструкцій;* [b] *Доктор техн. наук, професор*

[*] *Автор для листування: alexminak32@gmail.com*

Анотація. *Безпекова ситуація в Україні обумовлює критичну потребу в мобільних укриттях цивільного захисту, проєктування яких потребує матеріалів з високими динамічними характеристиками. У даній роботі виконано систематичний порівняльний аналіз моделей динамічного коефіцієнта підвищення міцності (DIF), даних вибухостійкості та балістичної стійкості фібробетонів (ФБ) різних класів. Встановлено, що еталонні DIF-формули CEB-FIP Model Code 2010 завищують коефіцієнт динамічного підвищення міцності при стиску для ФБ на 6–57% залежно від класу міцності, а для ультрависокоміцного ФБ (UHPFRC) спостерігається практично нульова чутливість до швидкості деформації при* $\dot{\varepsilon} < 90\ с^{-1}$. *Систематизовано дані щодо оптимального вмісту волокон (2% за об'ємом для вибухостійкості) та конструктивних рішень (тришарове компонування UHPFRC, сандвіч-панелі S-UHPC-S). Ідентифіковано п'ять критичних дослідницьких прогалин, зокрема відсутність DIF-даних для базальтового ФБ у вибуховому діапазоні швидкостей деформації та нормативний вакуум у fib Model Code 2020 та українських стандартах. Обґрунтовано необхідність експериментальних досліджень фібробетонних композицій, оптимізованих для мобільних укриттів.*

Ключові слова: *фібробетон, динамічний коефіцієнт підвищення міцності, вибухостійкість, мобільне укриття, швидкість деформації, UHPFRC, цивільний захист*.

DYNAMIC PROPERTIES OF FIBER-REINFORCED CONCRETE FOR CIVIL DEFENSE MOBILE SHELTERS: REVIEW AND ANALYSIS

Minakov O. I.[1,a,*], **Kroviakov S. O.**[1,b]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

[a] *PhD student at the Dept. of Building Products and Structures Production; b D.Sc. (Eng.), Prof.*

[*] *Corresponding author: alexminak32@gmail.com*

Abstract. *The security situation in Ukraine necessitates a critical demand for mobile civil defense shelters, the design of which requires materials with high dynamic properties. This paper presents a systematic comparative analysis of Dynamic Increase Factor (DIF) models, blast resistance data, and ballistic resistance of fiber-reinforced concretes (FRC) of various classes. It is established that the reference CEB-FIP Model Code 2010 DIF formulas overestimate the compressive dynamic increase factor for FRC by 6–57% depending on the strength class, while ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) exhibits virtually zero strain rate sensitivity at* $\dot{\varepsilon} < 90\ s^{-1}$. *Data on optimal fiber content (2% by volume for blast resistance) and structural solutions (three-layer UHPFRC configuration, S-UHPC-S sandwich panels) are systematized. Five critical research gaps are identified, including the absence of DIF data for basalt FRC in the blast strain rate range and the normative vacuum in fib Model Code 2020 and Ukrainian standards. The necessity for experimental studies of fiber-reinforced concrete compositions optimized for mobile shelters is substantiated.*

Keywords: *fiber-reinforced concrete, dynamic increase factor, blast resistance, mobile shelter, strain rate, UHPFRC, civil defense*.

Вступ. Повномасштабне вторгнення 2022 року та систематичні ракетні й дронові атаки на цивільну інфраструктуру України створили безпрецедентну потребу у захисних спорудах цивільного захисту. Прийняття ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» [1] та ДСТУ 9329:2025 «Первинні (мобільні) укриття» [2] формалізувало вимоги до нового класу конструкцій – мобільних укриттів, що мають поєднувати захист від уламків, вибухової хвилі та куль із можливістю швидкого розгортання без важкої техніки.

Традиційний залізобетон має суттєві обмеження для таких застосувань: крихке руйнування з утворенням високошвидкісних фрагментів (сколювання), що є критичною загрозою для осіб усередині укриття; низьке поглинання енергії при динамічних навантаженнях; значна маса конструкцій, що унеможливлює мобільність [3, 4].

Фібробетон (ФБ) – композитний матеріал на основі цементної матриці, дисперсно армований волокнами (сталевими, базальтовими, полімерними або їх комбінаціями) – є перспективною альтернативою завдяки ефекту перемичкування тріщин (fiber bridging), що забезпечує зміну характеру руйнування з крихкого на в’язкий, контроль ширини тріщин та підвищене поглинання енергії [5, 6]. Водночас проєктування захисних конструкцій з ФБ потребує достовірних моделей поведінки матеріалу при високих швидкостях деформації (10^1–10^3 $с^{-1}$), характерних для вибухового та ударного навантаження, що суттєво відрізняється від квазістатичних умов стандартних випробувань.

Мета роботи – систематичний порівняльний аналіз динамічних характеристик фібробетону (DIF-моделі, вибухостійкість, балістична стійкість) та ідентифікація дослідницьких прогалин, критичних для проєктування мобільних укриттів цивільного захисту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Динамічна поведінка бетонних матеріалів є предметом інтенсивних досліджень протягом останніх десятиліть. Wu et al. [5] виконали найновіший комплексний огляд динамічних властивостей ФБ, що охоплює методи випробувань, експериментальні дані та моделі. Noh et al. [7] запропонували перші уніфіковані DIF-рівняння, диференційовані за класами ФБ (FRCC, UHPFRC). Liu et al. [3] виконали комплексний огляд досліджень плит, балок та колон з UHPC при вибуховому навантаженні.

В Україні дослідження ФБ для захисних конструкцій розвиваються у кількох наукових школах. Саніцький та ін. [8] розробили модифікований сталефібробетон для фортифікаційних споруд (fcm = 79,4 МПа, швидке тверднення, балістичні випробування 7,62 мм). Марущак та ін. [9] створили наномодифікований швидкотвердний ФБ із ударною стійкістю 200 Н (проти 100–150 Н контрольного зразка) та зміною моди руйнування з крихкого на в’язкий. Кровяков та ін. [10] розвивають методологію оптимізації складу ФБ для жорстких покриттів та промислових підлог.

Водночас жодне з відомих досліджень не виконує систематичного порівняння DIF-моделей звичайного бетону та ФБ у контексті проєктування мобільних укриттів; відсутня систематизація даних вибухостійкості та балістичної стійкості стосовно цього конкретного застосування; не ідентифіковано комплекс дослідницьких прогалин, що перешкоджають нормативному регулюванню ФБ при динамічних навантаженнях.

Мета та завдання. Мета роботи – систематичний аналіз динамічних характеристик фібробетону та ідентифікація оптимальних матеріальних рішень для конструкцій мобільних укриттів цивільного захисту.

Завдання: (1) порівняти існуючі DIF-моделі для звичайного бетону та ФБ різних класів; (2) систематизувати дані вибухостійкості та балістичної стійкості ФБ; (3) ідентифікувати дослідницькі прогалини, критичні для проєктування мобільних укриттів; (4) сформулювати рекомендації щодо напрямків подальших досліджень.

Основний матеріал і результати.

Моделі динамічного коефіцієнта підвищення міцності. Динамічна поведінка бетону суттєво залежить від швидкості деформації (strain rate, $\dot{\varepsilon}$) – параметра, що охоплює діапазон понад 12 порядків: від повзучості (10^{-8}–10^{-5} $с^{-1}$) через квазістатичне навантаження (10^{-5}–10^{-3} $с^{-1}$) до вибуху (10^{1}–10^{3} $с^{-1}$). Для кожного діапазону характерні специфічні значення коефіцієнта динамічного підвищення міцності (Dynamic Increase Factor, DIF) – відношення динамічної міцності до статичної [5, 7].

Еталонною моделлю DIF при стиску є формула CEB-FIP Model Code 2010 [11] – білінійна залежність у логарифмічному масштабі з перехідною швидкістю деформації 30 $с^{-1}$, що відображає зміну домінуючого механізму від в'язкого гальмування мікротріщин до інерційного бічного обмеження [11, 12]. Для DIF при розтягу Malvar та Ross [13] на основі аналізу 10 незалежних експериментальних джерел продемонстрували, що CEB-формула суттєво занижує TDIF при $\dot{\varepsilon} > 1$ $с^{-1}$, та запропонували модифікацію зі зниженням перехідної швидкості з 30 до 1 $с^{-1}$. Максимальне зафіксоване значення TDIF ≈ 7 при $\dot{\varepsilon} = 157$ $с^{-1}$ [13].

Зазначені формули не враховують наявності волокон як параметра. Noh et al. [7] запропонували перші спеціалізовані DIF-рівняння для фіброцементних композитів – шість білінійних рівнянь з окремою калібрацією для FRCC/HPFRCC (fc < 120 МПа) та UHPFRC (fc > 150 МПа). Ключова відмінність від CEB-FIP – зсув перехідної швидкості деформації: 60 $с^{-1}$ (стиск FRCC), 90 $с^{-1}$ (стиск UHPFRC) та 10 $с^{-1}$ (розтяг FRCC) замість універсальних 30 $с^{-1}$ для звичайного бетону [7]. Порівняння DIF за моделями CEB-FIP MC2010 та Noh et al. наведено у Таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння DIF за моделями CEB-FIP MC2010 (звичайний бетон, fcm = 40 МПа) та Noh et al. [7] для фіброцементних композитів: розрахунок за формулами [7, 11]

$\dot{\varepsilon}$, $с^{-1}$	Режим	MC2010 CDIF	Noh CDIF (FRCC)	Noh CDIF (UHPFRC)	Noh TDIF (FRCC)
1	Удар	1,30	1,22	1,02	1,30
10	Удар	1,37	1,25	1,02	1,23
100	Вибух	2,11	1,76	1,04	2,94
300	Вибух	3,04	2,77	1,32	3,76

Аналіз Таблиці 1 виявляє два принципових висновки. По-перше, CEB-FIP MC2010 завищує DIF при стиску для FRCC на 6–17%, а для UHPFRC – на 50–57% при високих швидкостях деформації [7]. Це пояснюється ефектом перемичкування волокон, який створює додаткове бічне обмеження та знижує чутливість до швидкості деформації. Показово, що UHPFRC демонструє практично нульову чутливість до швидкості деформації нижче 90 $с^{-1}$ (CDIF ≈ 1,02), що принципово відрізняє його від звичайного бетону [7]. По-друге, при розтягу ситуація інвертується: TDIF для FRCC перевищує CDIF вже при $\dot{\varepsilon} \approx 10$ $с^{-1}$, досягаючи 3,76 при 300 $с^{-1}$. Це означає, що для захисних конструкцій, де розтягові напруження від ударної хвилі є критичним фактором руйнування (сколювання), застосування DIF-моделей звичайного бетону до ФБ є неприйнятним [7].

Еволюція DIF-моделей утворює чітку генеалогію: CEB-FIP MC1990 → Malvar та Ross [13] (корекція TDIF) → Wang et al. [12] (бінарний параметр для ФБ, зменшення похибки з 16–18% до 3%) → Yang et al. [14] (дискретні параметри форми та дозування волокон) → Noh et al. [7] (уніфіковані рівняння для класів ФБ). Жодна з цих моделей не входить до жодного нормативного документу. DIF-формули fib MC2010 залишаються визначеними виключно для звичайного бетону [11], і цей нормативний вакуум зберігається у fib Model Code 2020, де нормативне покриття фібробетону суттєво розширено, проте DIF-формули залишаються без змін та визначеними виключно для звичайного бетону [15].

Експериментальні дані SHPB. Основним методом визначення DIF у вибуховому діапазоні швидкостей деформації є метод стрижня Хопкінсона з розщепленням (Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) [5]. Експериментальні SHPB-дослідження виявляють суперечливий вплив волокон на DIF, що суттєво залежить від класу міцності матриці. Bian et al. [16] встановили, що для самоущільнюваного сталефібробетону (fc ≈ 40–60 МПа, Vf = 0,5–2,0%) DIF при $\dot{\varepsilon}$ = 50–240 $с^{-1}$ перевищує значення за CEB-FIP, тобто сталеві волокна збільшують швидкісну чутливість при середньому класі міцності. Протилежний результат отримали Lv et al. [17] для UHPSFRC (fc = 100,65 МПа): DIF армованого ФБ виявився систематично нижчим за DIF неармованого UHPC; для складу з Vf = 1,5% DIF при $\dot{\varepsilon}$ = 90–140 $с^{-1}$ становив лише 0,81–0,88 – динамічна міцність при стиску була навіть нижчою за статичну [17]. Парадокс протилежних тенденцій відповідає закономірностям моделі Noh et al. [7] і має критичне значення для проєктування: знак та величина впливу волокон на DIF залежать від класу міцності матриці, що унеможливлює використання єдиного коригувального коефіцієнта для всіх типів ФБ.

Дослідження гібридних фібросистем засвідчують додаткові можливості оптимізації. Lin et al. [18] встановили суперадитивний ефект для гібриду поліоксиметиленового (POM) та сталевого волокон в UHPC (Vf = 3%): при $\dot{\varepsilon} \approx 100$ с$^{-1}$ експериментальна динамічна міцність перевищувала розраховану за лінійною суперпозицією на +4,7–6,7% [18]. Zhao et al. [19] для гібриду синтетичного (PSF) та сталевого волокон (Vf = 2%) визначили оптимальне співвідношення PSF:SF = 1:3 при $\dot{\varepsilon}$ = 47–166 с$^{-1}$ [19].

Вибухостійкість ФБ. Mohamed et al. [4] за результатами параметричного чисельного дослідження в ABAQUS/Explicit встановили, що UHPC зменшує прогин у середині прольоту колон на ~60% (квадратний переріз) та ~55% (круглий переріз) порівняно з бетоном нормальної міцності при масштабованій відстані Z = 0,5 м/кг$^{1/3}$ [4]. Зі зменшенням Z характер руйнування змінюється від пластичного згинального до зсувного зламу, причому UHPC зміщує цю межу у бік менших Z, утримуючи конструкцію в більш пластичному режимі [4].

Le et al. [20] за результатами натурних випробувань плит з UHPFRC при ближньому підриві 0,55 кг ТНТ встановили, що оптимальний вміст сталевих волокон становить Vf = 2% за критерієм одночасної максимізації вибухостійкості та економічної ефективності [20]. Цей висновок узгоджується з Liu et al. [3], які зафіксували, що збільшення Vf з 2% до 4–6% дає лише обмежене покращення.

Yang et al. [21] на основі 37 натурних контактних вибухових випробувань плит з SFRC (2000×2000×400 мм, fc = 81,5 МПа) ідентифікували п’ять характерних мод пошкодження – від незначного пошкодження до пробиття – та встановили, що найефективнішу стійкість до сколювання забезпечує конфігурація: сталеві волокна з гаком (hook-end), l = 30 мм, l/d = 80, Vf = 3% [21]. Показово, що при Vf = 1,5% навіть за мінімальної приведеної відстані пробиття не відбулось, тоді як бетон без волокон зазнав повного пробиття [21].

Балістична стійкість ФБ. Li P.P. et al. [22] у першому систематичному параметричному дослідженні DOP UHPFRC при обстрілі 7,62 × 51 мм NATO AP (843–926 м/с, 37 мішеней) встановили, що прямі сталеві волокна 13 мм забезпечують менший DOP, ніж гакові 30 мм (62 мм проти 66 мм при Vf = 1%), завдяки у 7,5 разів вищій числовій щільності [22]. Введення базальтового заповнювача зменшило DOP на ~14,5% [22]. Цей результат протилежний даним вибухових випробувань, де гакові волокна оптимальні [21], що пояснюється різницею механізмів: при балістиці ключовим є контактне стирання снаряда волокнами, при вибуху – анкерування при розтягу.

Cao et al. [23] дослідили багатошарове компонування UHPFRC (одно-, дво- та тришарові мішені, 30 зразків, 7,62 мм NATO AP ~840 м/с) та встановили, що оптимальна тришарова конфігурація з крупним базальтовим заповнювачем та волокнами у зовнішніх шарах забезпечує зменшення DOP на ~22% порівняно з монолітною мішенню [23]. Авторами запропоновано аналітичну модель DOP для n-шарових мішеней на основі теорії розширення порожнини з точністю >95% [23].

Конструктивні рішення для укриттів. Mára et al. [24] верифікували концепцію тонкостінних модульних панелей з UHPFRCC (товщина 40 мм, маса < 55 кг, fc = 149 МПа) проти балістичної (9 мм Luger, > 50 пострілів без перфорації) та вибухової (3,6 кг ТНТ на 3,4 м) загроз [24]. Ключова перевага системи – мобільність без важкої техніки та спрощена заміна пошкоджених елементів, що відповідає вимогам до мобільних укриттів [24]. Liang, Yu та Fang [25] продемонстрували ефективність сандвіч-стін S-UHPC-S: при Z = 0,2 м/кг$^{1/3}$ S-UHPC-S зразки мали лише волосяні тріщини, тоді як стіни зі звичайним бетоном зазнали зсувного руйнування [25].

Ідентифіковані дослідницькі прогалини. Систематичний аналіз літератури дозволив ідентифікувати п’ять критичних прогалин, що перешкоджають проєктуванню мобільних укриттів з ФБ (Таблиця 2).

Таблиця 2

Систематизація дослідницьких прогалин щодо ФБ для мобільних укриттів

№	Прогалина	Наявні дані	Наслідок для проєктування
1	Відсутність DIF для базальтового ФБ при $\dot{\varepsilon} > 100$ с$^{-1}$	SHPB-дані лише до 90 с$^{-1}$ [5]	Неможливість розрахунку при вибуху
2	Жодне дослідження не поєднує швидкотвердний ФБ з вибуховими випробуваннями	Балістика [8]; динаміка без швидкого тверднення	Не підтверджена придатність для мобільних укриттів
3	Гібрид базальт + сталь не досліджений при SHPB	Дані лише для сталь + синтетика [18, 19]	Потенційно оптимальна комбінація без верифікації
4	Відсутня методика «вартість – ефективність» для ФБ укриттів	Лише [20] адресує це питання	Неможливість оптимізації складу
5	Нормативний вакуум: fib MC2010/2020, ДСТУ – DIF лише для звичайного бетону	MC2020 Ch.18 не містить DIF для ФБ [11, 15]	Проєктування без нормативного підґрунтя

Висновки.

1. Еталонні DIF-формули CEB-FIP Model Code 2010 є неадекватними для фібробетону: завищення коефіцієнта динамічного підвищення міцності при стиску сягає 57% для UHPFRC, що призводить до неконсервативного проєктування захисних конструкцій. Спеціалізовані моделі Noh et al. [7] є обґрунтованою альтернативою, підтвердженою незалежними чисельними дослідженнями.

2. UHPFRC є найперспективнішим класом ФБ для тонкостінних мобільних укриттів завдяки практично нульовій чутливості до швидкості деформації при $\dot{\varepsilon} < 90$ с$^{-1}$, винятковому поглинанню енергії та можливості створення модульних панелей масою до 55 кг.

3. Оптимальний вміст сталевих волокон для вибухостійкості становить ~2% за об’ємом – точка перегину, після якої маргінальне покращення захисних характеристик не виправдовує зростання вартості.

4. Тип та геометрія волокон мають бути обрані відповідно до домінуючої загрози: гакові волокна оптимальні для вибухостійкості (анкерування при розтягу), прямі короткі – для балістичної стійкості (числова щільність та контактне стирання).

5. Нормативний вакуум – відсутність DIF-формул для ФБ у fib Model Code 2010/2020 та українських стандартах – є центральною перешкодою для проєктування мобільних укриттів з ФБ та потребує розробки відповідних рекомендацій на основі результатів подальших експериментальних досліджень.

Перспективами подальших досліджень є проведення SHPB-випробувань базальтового та гібридного (базальт + сталь) ФБ у вибуховому діапазоні швидкостей деформації; розробка швидкотвердних складів ФБ з верифікованими динамічними характеристиками; натурні вибухові випробування елементів мобільних укриттів.

Література

1. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. (Чинний від 2024-01-01). Київ, 2023.
2. ДСТУ 9329:2025. Первинні (мобільні) укриття. Параметри та методи випробування. Київ, 2025.
3. Liu J, Wei J, Li J, Su Y, Wu C. A comprehensive review of ultra-high performance concrete (UHPC) behaviour under blast loads. *Cement and Concrete Composites*, 2024;148:105449.
4. Mohamed AA, Ali O, Metwally IM. Blast performance of RC columns with different levels of concrete grades and reinforcing ratios. *Structural Concrete*, 2025;26(3):3282–3304.

5. Wu H, Shen A, Ren G, Ma Q, Wang Z, Cheng Q, Li Y. Dynamic mechanical properties of fiber-reinforced concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 2023;366:130145.
6. Brandt AM. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, 2008;86(1–3):3–9.
7. Noh HW, Truong VD, Cho JY, Kim DJ. Dynamic increase factors for fiber-reinforced cement composites: A review. *Journal of Building Engineering*, 2022;56:104769.
8. Sanytsky M, Kropyvnytska T, Shyiko O, Bobetskyi Yu, Volianiuk A. High strength steel fiber reinforced concrete for fortification protected structures. *Theory and Building Practice*. 2023;5(1):37–42.
9. Marushchak U, Sanytsky M, Mazurak T, Olevych Y. Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018;1/6(91):34–41.
10. Kos Ž, Kroviakov S, Kryzhanovskyi V, Grynyova I. Research on the optimal fiber reinforcement of the standard and high-strength concrete pavement. *Materials*, 2023;16(17):5886.
11. fib. Model Code for Concrete Structures 2010, Vol. 1. Lausanne: fib; 2013.
12. Wang S, Zhang MH, Quek ST. Effect of high strain rate loading on compressive behaviour of fibre-reinforced high-strength concrete. *Magazine of Concrete Research*, 2011;63(11):813–827.
13. Malvar LJ, Ross CA. Review of strain rate effects for concrete in tension. *ACI Materials Journal*, 1998;95(6):735–739.
14. Yang L, Lin X, Gravina RJ. Evaluation of dynamic increase factor models for steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 2018;190:632–644.
15. Zhang F, De Corte W, Liu X, Bao Y, Taerwe L. A modified trilinear post-cracking model for fiber-reinforced concrete to improve the evaluation of the serviceability limit state performance. *Materials*, 2025;18(7):1395.
16. Bian J, Cao W, Dong H, Yang L. Dynamic compressive behavior of self-compacting steel fiber reinforced concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2021;2021:8085949.
17. Lv X, Li Y, Guo H, Liang W, Zhai Y, Li L. The dynamic mechanical properties and damage constitutive model of ultra-high-performance steel-fiber-reinforced concrete (UHPSFRC) at high strain rates. *Materials*, 2024;17(3):703.
18. Lin JX, Su JY, Pan HS, Peng YQ, Guo YC, Chen WS, Sun XL, Yuan BX, Liu GT, Lan XW. Dynamic compression behavior of ultra-high performance concrete with hybrid polyoxymethylene fiber and steel fiber. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022;20:4473–4486.
19. Zhao S, Liu R, Liu J, Yang L. Comparative study on the effect of steel and plastic synthetic fibers on the dynamic compression properties and microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composite Structures*, 2023;324:117570.
20. Le DB, Nguyen PT, Pham HD, Mai VC, Ngo LD, Doan HX, Nguyen HTN. Blast-resistant performance of UHPFRC: An experimental study and optimal steel fiber content. *International Journal of Protective Structures*, 2025. doi:10.1177/20414196251336761.
21. Yang D, Zhang B, Liu G. Experimental study on spall resistance of steel-fiber reinforced concrete slab subjected to explosion. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2021;15:23.

22. Li PP, Brouwers HJH, Yu QL. Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance. *International Journal of Impact Engineering*, 2020;136:103434.
23. Cao YYY, Li PP, Brouwers HJH, Yu QL. Resistance of multi-layered UHPFRC against in-service projectile: Experimental investigation and modelling prediction. *Composite Structures*, 2020;244:112295.
24. Mára M, Talone C, Sovják R, Fornušek J, Zatloukal J, Kheml P, Konvalinka P. Experimental investigation of thin-walled UHPFRCC modular barrier for blast and ballistic protection. *Applied Sciences*, 2020;10(23):8716.
25. Liang SL, Yu J, Fang Q. Experimental and numerical investigations on structural behavior of S-UHPC-S composite walls under near-field blast load. *Journal of Building Engineering*, 2024;98:111175.

References

1. DBN V.2.2-5:2023. Zakhysni sporudy tsyvil′noho zakhystu [State Building Standards of Ukraine DBN V.2.2-5:2023. Civil defense protective structures] (Chynnyy vid 2024-01-01 [Valid from 2024-01-01]). Kyiv, 2023.
2. DSTU 9329:2025. Pervynni (mobil′ni) ukryttya. Parametry ta metody vyprobuva. [National Standard of Ukraine Primary (mobile) shelters - Parameters and test methods]. Kyiv, 2025.
3. Liu J, Wei J, Li J, Su Y, Wu C. A comprehensive review of ultra-high performance concrete (UHPC) behaviour under blast loads. *Cement and Concrete Composites*, 2024;148:105449.
4. Mohamed AA, Ali O, Metwally IM. Blast performance of RC columns with different levels of concrete grades and reinforcing ratios. *Structural Concrete*, 2025;26(3):3282–3304.
5. Wu H, Shen A, Ren G, Ma Q, Wang Z, Cheng Q, Li Y. Dynamic mechanical properties of fiber-reinforced concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 2023;366:130145.
6. Brandt AM. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*, 2008;86(1–3):3–9.
7. Noh HW, Truong VD, Cho JY, Kim DJ. Dynamic increase factors for fiber-reinforced cement composites: A review. *Journal of Building Engineering*, 2022;56:104769.
8. Sanytsky M, Kropyvnytska T, Shyiko O, Bobetskyi Yu, Volianiuk A. High strength steel fiber reinforced concrete for fortification protected structures. *Theory and Building Practice*. 2023;5(1):37–42.
9. Marushchak U, Sanytsky M, Mazurak T, Olevych Y. Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018;1/6(91):34–41.
10. Kos Ž, Kroviakov S, Kryzhanovskyi V, Grynyova I. Research on the optimal fiber reinforcement of the standard and high-strength concrete pavement. *Materials*, 2023;16(17):5886.
11. fib. Model Code for Concrete Structures 2010, Vol. 1. Lausanne: fib; 2013.
12. Wang S, Zhang MH, Quek ST. Effect of high strain rate loading on compressive behaviour of fibre-reinforced high-strength concrete. *Magazine of Concrete Research*, 2011;63(11):813–827.

13. Malvar LJ, Ross CA. Review of strain rate effects for concrete in tension. *ACI Materials Journal*, 1998;95(6):735–739.
14. Yang L, Lin X, Gravina RJ. Evaluation of dynamic increase factor models for steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 2018;190:632–644.
15. Zhang F, De Corte W, Liu X, Bao Y, Taerwe L. A modified trilinear post-cracking model for fiber-reinforced concrete to improve the evaluation of the serviceability limit state performance. *Materials*, 2025;18(7):1395.
16. Bian J, Cao W, Dong H, Yang L. Dynamic compressive behavior of self-compacting steel fiber reinforced concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2021;2021:8085949.
17. Lv X, Li Y, Guo H, Liang W, Zhai Y, Li L. The dynamic mechanical properties and damage constitutive model of ultra-high-performance steel-fiber-reinforced concrete (UHPSFRC) at high strain rates. *Materials*, 2024;17(3):703.
18. Lin JX, Su JY, Pan HS, Peng YQ, Guo YC, Chen WS, Sun XL, Yuan BX, Liu GT, Lan XW. Dynamic compression behavior of ultra-high performance concrete with hybrid polyoxymethylene fiber and steel fiber. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022;20:4473–4486.
19. Zhao S, Liu R, Liu J, Yang L. Comparative study on the effect of steel and plastic synthetic fibers on the dynamic compression properties and microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composite Structures*, 2023;324:117570.
20. Le DB, Nguyen PT, Pham HD, Mai VC, Ngo LD, Doan HX, Nguyen HTN. Blast-resistant performance of UHPFRC: An experimental study and optimal steel fiber content. *International Journal of Protective Structures*, 2025. doi:10.1177/20414196251336761.
21. Yang D, Zhang B, Liu G. Experimental study on spall resistance of steel-fiber reinforced concrete slab subjected to explosion. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2021;15:23.
22. Li PP, Brouwers HJH, Yu QL. Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance. *International Journal of Impact Engineering*, 2020;136:103434.
23. Cao YYY, Li PP, Brouwers HJH, Yu QL. Resistance of multi-layered UHPFRC against in-service projectile: Experimental investigation and modelling prediction. *Composite Structures*, 2020;244:112295.
24. Mára M, Talone C, Sovják R, Fornušek J, Zatloukal J, Kheml P, Konvalinka P. Experimental investigation of thin-walled UHPFRCC modular barrier for blast and ballistic protection. *Applied Sciences*, 2020;10(23):8716.
25. Liang SL, Yu J, Fang Q. Experimental and numerical investigations on structural behavior of S-UHPC-S composite walls under near-field blast load. *Journal of Building Engineering*, 2024;98:111175.

UDC 666.965:621.039.7

CLAY-BASED GEOPOLYMERS FOR RADIONUCLIDES UPTAKE

Bershadskyi A.[1,a,*], **Chystiakov A.**[1,b], **Horniaček M.**[1,c], **Michal Slaný**[1,2,d]

[1] *Department of Materials Engineering and Physics, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia;* [2] *Institute of Inorganic Chemistry, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia*

[a] *PhD student;* [b] *Researcher;* [c] *Master's student (SvF I-TS 1);* [d] *PhD, Assistant Professor*

[*] *Corresponding author: anton.bershadskyi@stuba.sk*

Abstract. *Geopolymer composites were synthesised from bentonite and kaolin through thermal treatment, alkali activation, and subsequent heat- and moisture-curing. The resulting materials were tested under laboratory conditions for their ability to adsorb and immobilise radionuclides, specifically cobalt and caesium, from artificially contaminated solutions. Structural characterisation was performed using Fourier transform infrared spectroscopy and scanning electron microscopy, confirming the formation of reactive aluminosilicate matrices with crystalline zeolitic phases. Sorption studies demonstrated rapid uptake kinetics and removal efficiencies of up to 90% for Co and Cs, consistent with Langmuir-type monolayer adsorption, highlighting the effectiveness and predictability of the process. The developed geopolymers exhibited high sorption capacity across a broad range of radionuclide concentrations, suggesting strong potential for environmental remediation of contaminated soils and water. Mechanical testing results indicate that these bentonite- and kaolin-based geopolymer composites, after solidification, are suitable for use in the production of containers for the disposal of hazardous radioactive waste.*

Keywords: *geopolymers, metabentonite, metakaolin, radionuclides uptake, caesium, cobalt, environment, hazardous waste disposal*.

Introduction. Intensive industrial activity has increased the release of hazardous substances into ecosystems, particularly heavy metals and radionuclides from mining, metallurgy, wastewater, nuclear energy, and improper waste disposal. Heavy metals are dense, stable, and toxic at low concentrations, while radionuclides emit long-term ionising radiation. Both persist without degradation, accumulate in organisms, and biomagnify through food chains, causing organ damage, cancer, and genetic disorders. Current remediation technologies include chemical precipitation, membrane filtration, ion exchange, and solidification (cementation, bituminization). However, these methods often generate secondary waste, require high energy and chemical input, and raise concerns about long-term stability. This highlights the need for alternative materials capable of both removing and immobilising hazardous ions.

Clay-based geopolymers offer such an alternative due to their adsorption capacity, stability, and environmental compatibility. Produced from abundant raw materials, they support circular resource use and sustainable construction. Bentonite and kaolin are widely used precursors. Bentonite, rich in montmorillonite, transforms above 650 °C into metabentonite with higher reactivity and surface area (up to 218.95 m^2/g [1]), making it suitable for adsorption and radionuclide immobilisation. Kaolin, composed mainly of kaolinite, forms reactive metakaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) when calcined at 600 – 800 °C and is widely used in geopolymer synthesis.

Geopolymers are produced by alkaline activation (commonly NaOH) of calcined aluminosilicates, forming a three-dimensional network after curing. Besides environmental applications, they are used as construction materials. Their compressive strength typically ranges from 40 to 100 MPa [2,3,4]. In addition to mechanical strength, geopolymers also exhibits high absorption properties of radionuclides [5] and heavy metals [6].

This study focuses on developing optimal bentonite- and kaolin-based geopolymer compositions, evaluating their adsorption of radionuclides (e.g., caesium and cobalt), and assessing mechanical properties for use in radioactive waste containment systems.

Materials and Methods. As raw materials for the study, kaolin OT 76 (Sedlecký kaolín, a.s., Božičany, Czech Republic) and bentonite P 030 (ENVIGEO, a.s., Banská Bystrica, Slovakia) were used. Sodium hydroxide and sodium silicate with 99% purity (Slavus, s.r.o., Bratislava, Slovakia) were used as alkaline activators.

Bentonite samples were calcined at two different temperatures (700 and 800 °C) in a muffle furnace (heating rate 12 °C/min, holding time 2 hours), while kaolin was calcined at a single temperature (700 °C). After cooling, the samples were stored in sealed plastic laboratory bags.

Table 1

Chemical composition of raw bentonite and kaolin.

	Composition / wt% of oxides							
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2
Bentonite	71.1	9.94	3.46	2.33	1.65	-	-	-
Kaolin	45.8	37.31	0.58	0.98	0.46	1.17	0.58	0.17

Geopolymer specimens were prepared using metakaolin (MK) and metabentonite (MB) as aluminosilicate precursors, with sodium hydroxide solutions (10 and 20 wt.%) employed as alkaline activators. The NaOH was first dissolved in water and then gradually added to MK or MB under continuous stirring to ensure a homogeneous mixture. The resulting paste was placed on a vibrating table for approximately 2 minutes to eliminate entrapped air. The mixture was subsequently cast into moulds measuring 120 × 20 × 20 mm and transferred to an oven positioned above a water bath. Curing was performed at 80 °C for 7 days. After curing, the samples were removed, cooled to room temperature in a desiccator, and ground into a fine powder. The powdered materials were stored in sealed polyethylene laboratory bags prior to further analysis.

In this study, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) was employed to track chemical changes during calcination and geopolymerisation. By comparing spectra of raw clays, calcined materials, and final geopolymers, the disappearance of bands related to structural hydroxyl groups, shifts in Si–O and Al–O vibrations, and the emergence of new bands associated with geopolymer network formation were identified. Samples were prepared by homogenising 1 mg of material with 200 mg of KBr in an agate mortar and pressing the mixture into pellets.

Scintillation gamma spectrometry was applied for qualitative and quantitative identification of gamma-emitting radionuclides. This method enables direct analysis without complex radiochemical preparation, as each radionuclide emits gamma photons with characteristic energies, allowing accurate identification and activity determination in the sample.

Results and Discussion. The FTIR spectrum of kaolin shows distinct absorption bands of structural hydroxyl groups in the range of 3690 – 3621 cm^{-1} and Si–O vibrations between 1150 and 980 cm^{-1}. After calcination, dehydroxylation leads to the disappearance of OH bands and the formation of a broad Si–O band in the region of 1250 – 940 cm^{-1}, characteristic of an amorphous aluminosilicate phase. Following alkaline activation, new OH-related bands appear in the regions of 3700 – 3100 cm^{-1} and around 1655 cm^{-1}, indicating the formation of a hydrated aluminosilicate gel. For bentonite, the initial spectrum displays a structural OH band at approximately 3630 cm^{-1}, water-related bands at 3424 and 1637 cm^{-1}, and a Si–O stretching vibration near 1041 cm^{-1}, reflecting the formation of a geopolymer network and crystalline zeolitic phases upon alkaline activation. Thermal treatment removes hydroxyl-related bands and results in broader bands at 1136 and 1084 cm^{-1}, associated with the formation of amorphous silica after montmorillonite dehydroxylation.

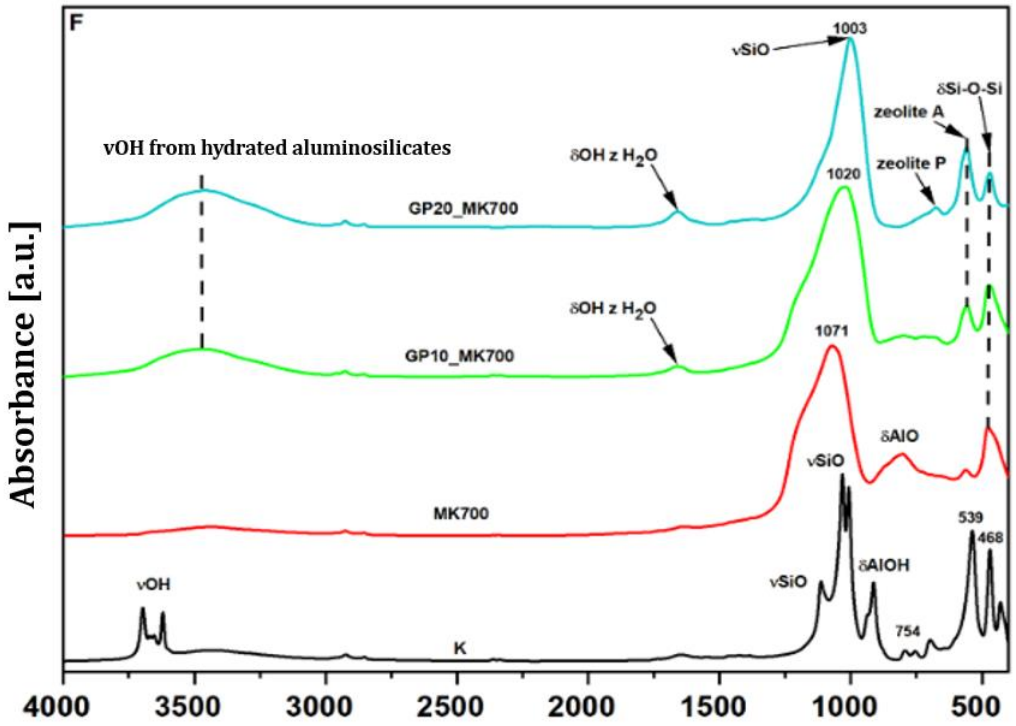


Fig. 1. FTIR spectra of kaolin (K), calcined kaolin (MK700), and alkali-activated MK with different weight % of NaOH (GP10/20_MK700)

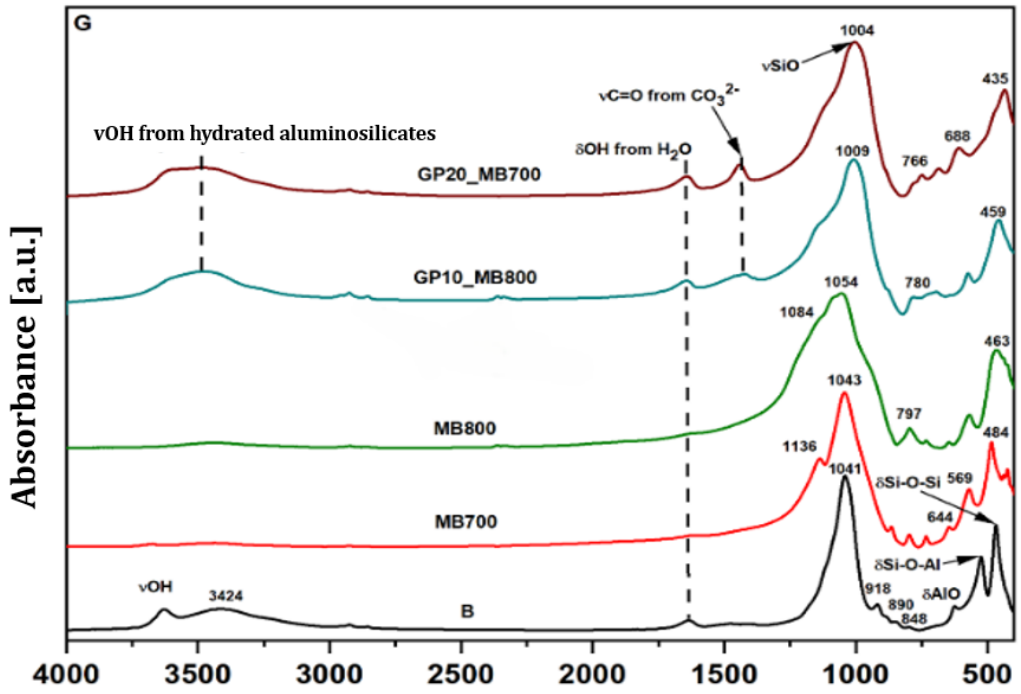


Fig. 2. FTIR spectra of bentonite (B), calcined bentonite (MB700/MB800), and alkali-activated MB with different weight % of NaOH (GP20_MB700) and (GP10_MB800)

According to scintillation gamma spectrometry, prepared geopolymers removed up to 90 % of Co and Cs from the solution. This high removal efficiency led to a rapid decrease in the concentration of available Co^{2+} and Cs^{+} ions, limiting further

adsorption. The remaining fraction of radionuclides, particularly cobalt, is assumed to exist in chemical forms less accessible for interaction with the geopolymer matrix. The pH of the solutions increased significantly after contact with the geopolymers, rising from an initial value of approximately 4.0 to above 8.0, with higher geopolymer dosages resulting in further increases. Geopolymers based on metabentonite generally produced a slightly greater pH increase than those based on metakaolin.

These results indicate that incomplete removal of Co and Cs is not due to surface saturation of the geopolymer. Additionally, the specific adsorption capacity (μmol/g) decreased with increasing geopolymer dosage. This behaviour is typical for many adsorbents and can be attributed to reduced mixing efficiency at higher solid concentrations and the formation of agglomerates, which decrease the effective surface area available for adsorption.

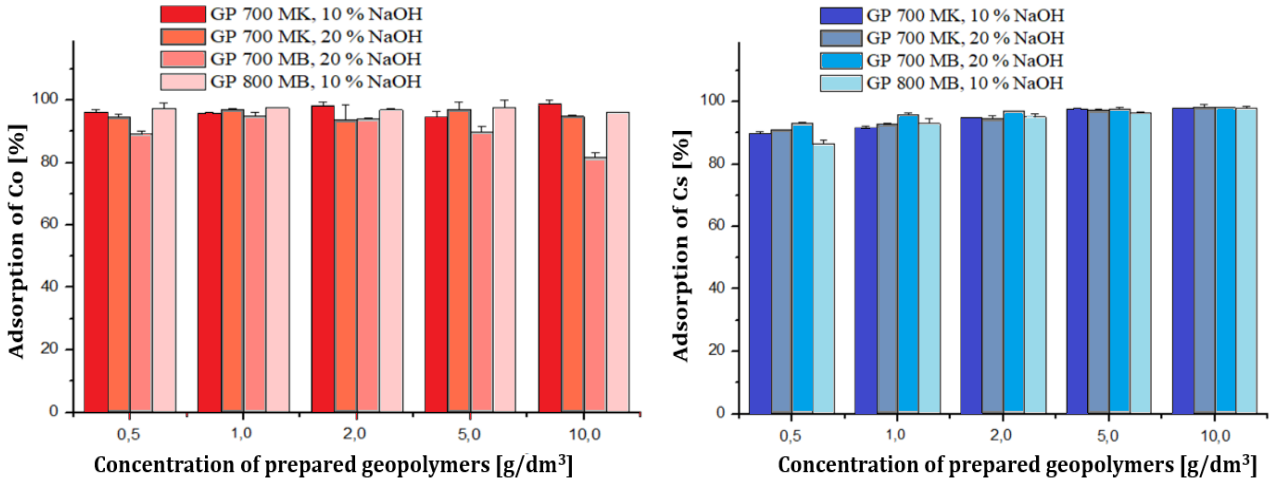


Fig. 3. Effect of the concentration of prepared geopolymers (GP) based on metakaolin (MK) and metabentonite (MB)

Conclusion. The results demonstrate that clay-based geopolymers derived from metakaolin and metabentonite exhibit sufficient sorption performance for environmental applications. SEM analysis revealed distinct morphological changes during geopolymerisation: metakaolin-based samples formed well-developed gel structures and cubic zeolitic phases, whereas metabentonite-based samples showed less defined crystallinity, the presence of microcracks caused by calcination, and particle agglomeration, indicating a strong dependence of microstructure on the precursor material. FTIR analysis confirmed dehydroxylation and the formation of geopolymer bonds, evidenced by characteristic shifts in Si–O and Al–O vibrations and signals associated with zeolitic phases.

Gamma spectrometry indicated that all investigated geopolymers effectively adsorbed radionuclides ^{60}Co and ^{137}Cs, achieving removal efficiencies above 90 % even at low concentrations. However, the specific adsorption capacity decreased with increasing geopolymer dosage, likely due to reduced mixing efficiency and particle agglomeration. Overall, the studied composites demonstrate high sorption capacity for radionuclide uptake and immobilisation, highlighting their strong potential for remediation of contaminated soils and water.

Acknowledgments. This work was supported by the Slovak Research and Development Agency under the Contract No. APVV-24-0133 and by the project Slovak Grant Agency VEGA (Grant 1/0278/25).

REFERENCES

1. Slaný, M., Kuzielová, E., Žemlička, M. et al. Metabentonite and metakaolin-based geopolymers/zeolites: relation between kind of clay, calcination temperature and concentration of alkaline activator. *J Therm Anal Calorim* 148, 10531–10547 (2023). https://doi.org/10.1007/s10973-023-12267-1.
2. Swagato Das, Purnachandra Saha , Swatee Prajna Jena , Pratyush Panda (2022) Geopolymer concrete: Sustainable green concrete for reduced greenhouse gas emission – A review, *Materials today*: proceedings. Vol. 60 pp. 62-71, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.588.
3. Fang Wang, Xiaokun Sun, Zhong Tao, Zhu Pan, Effect of silica fume on compressive strength of ultra-high-performance concrete made of calcium aluminate cement/fly ash based geopolymer, *Journal of Building Engineering*, Volume 62, 2022, 105398, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105398.
4. Steve W.M. Supit, Monita Olivia, Compressive strength and sulfate resistance of metakaolin-based geopolymer mortar with different ratio of alkaline activator, *Materials Today*: Proceedings, Volume 66, Part 5, 2022, Pages 2776-2779, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.514
5. Jiarui Liu, Yidong Xu, Wensheng Zhang, Jiayuan Ye, Rui Wang, Solidification performance and mechanism of typical radioactive nuclear waste by geopolymers and geopolymer ceramics: A review, *Progress in Nuclear Energy*, Volume 169, 2024, 105106, ISSN 0149-1970, https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105106
6. Sujitra Onutai, Takaomi Kobayashi, Parjaree Thavorniti, Sirithan Jiemsirilers, Porous fly ash-based geopolymer composite fiber as an adsorbent for removal of heavy metal ions from wastewater, *Materials Letters*, Volume 236, 2019, Pages 30-33, ISSN 0167-577X, https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.10.035.

UDC 666.965:544

CHEMICAL ASPECTS OF CREATING GEOPOLYMER CONCRETES ON ALUMINOSILICATE BYPRODUCTS

Chystiakov A.[1,a,*], **Bershadskyi A.**[1,b,], **Horniaček M.**[1,c], **Tocik M.**[1,c], **Slaný M.**[1,2,d]

[1] Department of Materials Engineering and Physics, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia

2 Institute of Inorganic Chemistry, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia

[a] Researcher; [b] PhD student; [c] Master's student (SvF I-TS 1); [d] PhD, Assistant Professor

[*] Corresponding author: *artem.chystiakov@stuba.sk*

Abstract. *This paper describes aspects of the chemical reactions and geopolymer formation from aluminosilicates. During the study, geopolymer compositions were synthesised from blast furnace slag and fly ash through alkaline activation followed by heat- and moisture treatment. The use of aluminosilicate-rich industrial wastes, particularly blast furnace slag, enables the production of geopolymers with high mechanical performance. The prepared slag-based composites were assessed for their potential as sustainable non-cement concretes with reliable strength characteristics. Such materials can be applied in conventional construction as well as in specialised structures requiring high chemical or thermal resistance, including hydrotechnical and nuclear facilities. Geopolymers may also be suitable for manufacturing containers for hazardous, toxic, or radioactive waste due to their strength, chemical durability, and potential radiation-shielding capability. Mechanical testing demonstrated high compressive strength (up to 45.4 MPa) and adequate flexural strength (up to 1.41 MPa), confirming their potential as sustainable structural materials capable of replacing conventional cement-based concrete in both standard and specialised applications.*

Keywords: *geopolymers, blast furnace slag, fly ash, geopolymer concrete, mechanical characteristics, cement replacement, hazardous waste disposal*.

Introduction. The construction sector is a major source of global CO_2 emissions, largely due to the production of construction materials. Cement manufacturing alone accounts for about 7 – 8 % of global CO_2 emissions because of energy-intensive processes such as limestone calcination at ~ 1450 °C and fossil-fuel combustion [1]. Therefore, reducing cement consumption through alternative binders, such as geopolymers, is an important strategy for lowering the environmental impact of construction.

High-strength geopolymers can be produced from aluminosilicate industrial wastes, including blast furnace slag **(BFS)** and fly ash **(FA)** [2]. These by-products of metallurgical and energy industries contain silicon and aluminium compounds and can be converted into geopolymer binders through alkaline activation, forming crystalline

structures. Although these wastes have growing applications in construction materials, 40 – 50 % of BFS still remains unused, highlighting the need for improved recycling and integration into industrial processes. Geopolymers on BFS show strengths of 30–40 MPa without heat treatment and up to 85 MPa with heat- and moisture-treatment, with most strength gained during the first seven days [3]. In addition, geopolymers demonstrate superior durability: they can withstand temperatures up to 1400 °C, whereas conventional concrete begins degrading at 300 – 500 °C [4]. They also resist aggressive chemical environments, maintaining performance in 5 – 10% H_2SO_4 solutions and across a pH range of 1 – 12 [5]. Furthermore, geopolymers can absorb 85 – 90 % of radiation and immobilise radionuclides such as caesium and strontium, making them suitable for nuclear-related applications [6]. Due to their high strength and chemical stability, slag-based geopolymers are promising for manufacturing containers for hazardous or radioactive waste [7]. While slag-based geopolymers show promising potential for waste-storage applications, application-specific assessment requires additional evidence on durability, leaching behaviour, and radiation resistance. In addition to their performance advantages, geopolymers offer relatively low production costs compared with conventional waste-storage solutions.

The novelty of this study lies in evaluating the mechanical properties of aluminosilicate-based geopolymers to assess their suitability for specialised structures and containers designed for the safe storage of hazardous toxic and radioactive waste.

Materials and Methods. As the main aluminosilicate raw material for geopolymer preparation, blast furnace slag from the U. S. Steel Košice metallurgical plant (Slovakia) and fly ash from Vojany power plant (Slovakia) were used. Considering that blast furnace slag and fly ash are already aluminosilicate materials suitable for alkaline activation, they do not require additional thermal treatment for calcination. Thus, the materials were used in raw form without additional firing. As fine aggregates and fillers in geopolymer concrete mixtures, quartz sand and recycled concrete aggregate, which can provide sufficient mechanical strength while supporting sustainability goals [8]. were used. Sodium silicate (Na_2SiO_3) with 99 % purity (Slavus, s.r.o., Bratislava, Slovakia) was used as the alkaline activator.

Samples of geopolymers were prepared using blast furnace slag as a binder and sodium silicate (Na_2SiO_3) in 10 wt.% concentration as the alkaline activator. The alkaline activator as dissolved in water and then added to the BFS powder under continuous mixing. When using fillers for geopolymer concrete, after mixing BFS with the alkaline-water solution, fine aggregates were added to the geopolymer paste. Fresh mixtures were poured into moulds measuring 20 × 20 × 120 mm and placed into a climatic chamber for heat- and moisture-treatment at 80 °C and a relative humidity of

(90 ± 5) % for 7 days. After curing, the samples were stabilised under room conditions. Detailed compositions of the developed geopolymers are presented in Table 1. Quartz sand, recycled concrete aggregate, and fly ash were used as aggregates for geopolymer concrete in amounts of 25 and 50 wt.%. These compositions are labelled Q, RCA, and FA, respectively. The correlations between the components were selected according to their bulk densities and then controlled and optimised after laboratory approval. Considering that the addition of fly ash in the geopolymer decreased the strength sufficiently, in Table 1, that material was considered an aggregate of the composite rather than a binder. Unlike in cement-based systems, water does not directly participate in the hardening of BFS and is required only to ensure sufficient plasticity of the mixture and dissolution of alkalis; therefore, it is more appropriate to evaluate not w/c of the mixture, but water/binder-aggregate ratio of the mixture (**w/b-a**).

Table 1

Geopolymers compositions

Label	Binder		Fine aggregate		Alkali [kg]	Water [l]	w/b-a ratio
	Type	[kg]	Type	[kg]			
GP_BFS	Blast furnace slag	1,785	-	-	185	500	0.28
GP_BFS-Q25		1,500	QS	500	150	410	0.21
GP_BFS-Q50		1,000	QS	1,000	100	450	0.23
GP_BFS-RCA25		1,500	RCA-f	500	150	480	0.24
GP_BFS-RCA50		1,000	RCA-f	1,000	100	540	0.27
GP_BFS-FA25		1,270	FA	530	185	670	0.37
GP_BFS-FA50		900	FA	900	185	670	0.37

* the specified amount of materials is given for 1 m^3 of concrete mixture

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (**FTIR**) was used to identify functional groups arising during geopolymer formation. It utilises infrared light to measure the radiation absorption of a sample at various wavelengths, producing a characteristic spectrum – often referred to as a molecular fingerprint. For analysis Nicolet 6700 Fourier Transform Infrared spectrometer from Thermo Scientific™ was used.

Scanning electron microscopy (**SEM**) used for detailed surface analysis of geopolymers with resolution up to 1 μm and magnifications of up to 500,000x. It enables visualisation of microstructures that are invisible to optical microscopes. For the observation of sample morphology, a Vega 3 scanning electron microscope from

Tescan (Czech Republic) was used, equipped with secondary electron (SE) and backscattered electron (BSE) detectors, operating at 30 kV.

For determining the mechanical characteristics of the developed geopolymers, their compressive strength, flexural strength and density were assessed. For that, geopolymer samples with dimensions 20 × 20 × 120 mm were prepared and tested. For each test, six samples were used, and the result was taken as the arithmetic average of the six values. According to previous research, it was determined that maximum strength geopolymer compositions are achieved at the age of 7 days when using heat- and moisture-treatment at 80 °C. In that case, mechanical characteristics within the current experiment were determined at the age of 7 days.

Results and Discussion. Results of FTIR analysis are shown in Fig. 1.

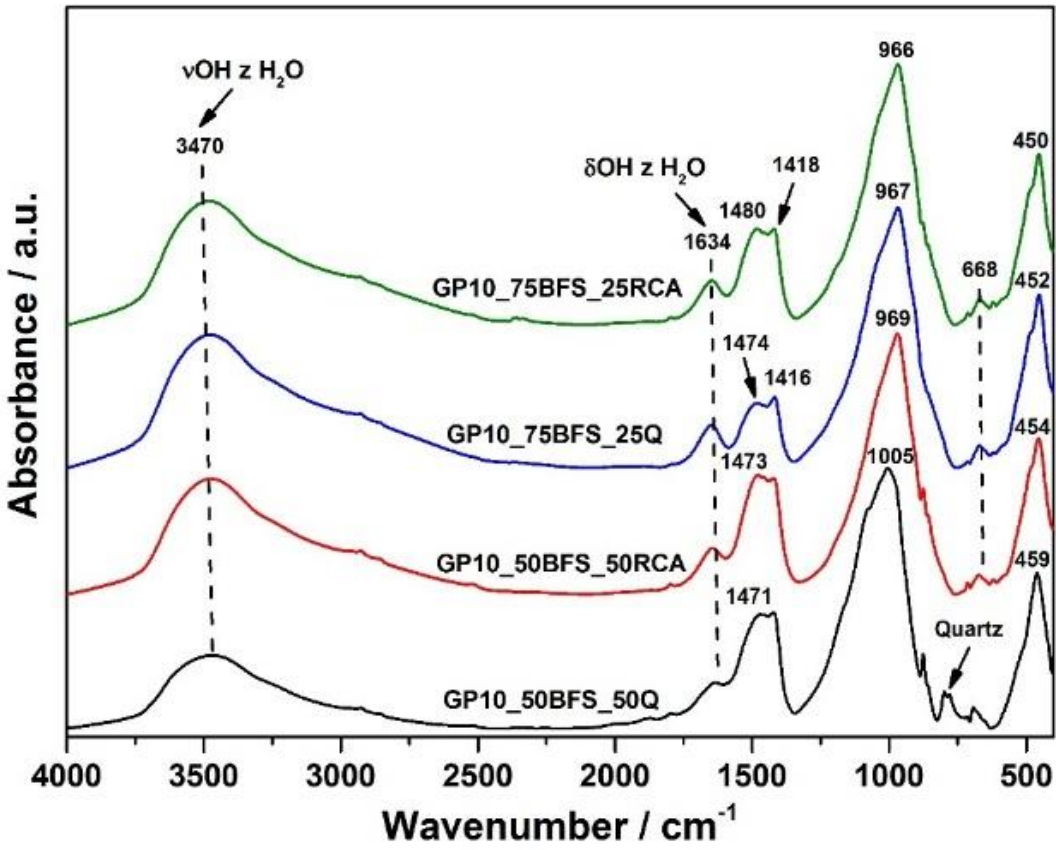
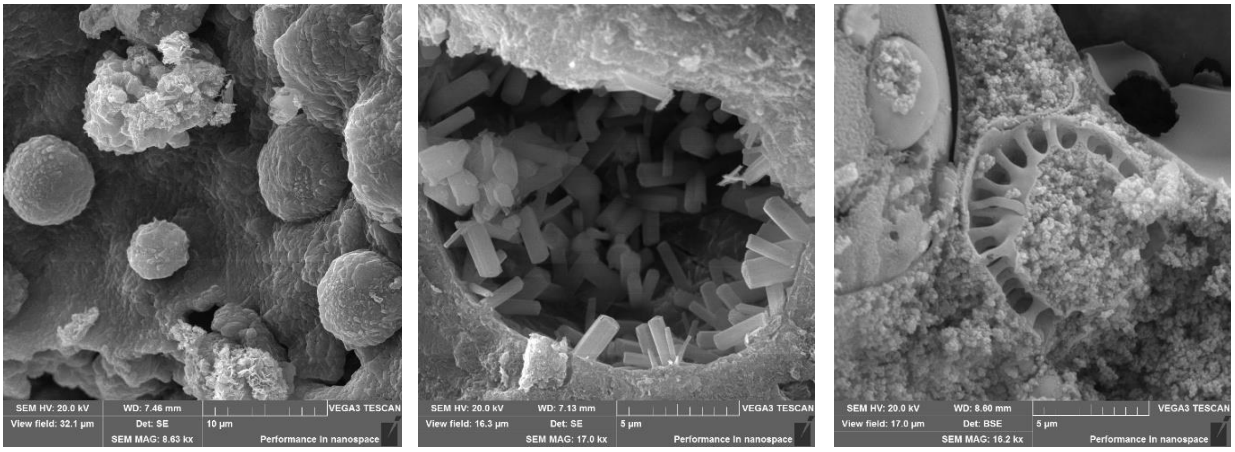


Fig. 1. FTIR spectra of geopolymer concrete composites

The intensity of the absorption bands corresponds to the quantity and therefore the proportion of functional groups in the structure of the prepared samples. On the contrary, the position of the absorption band corresponds to the qualitative composition of the prepared geopolymer samples. Absorption bands at 3470 and 1634 cm^{-1} were observed for all samples, which are assigned to the stretching and bending OH groups originating from H2O in geopolymer composites but also hygroscopic KBr, respectively. Absorption bands between 1500 and 1400 cm^{-1} confirm the presence of

carbonate. The shift of the main and most intense νSi–O band to a lower wavenumber is primarily associated with the formation of geopolymer structures. From the infrared spectra, shifts of the Si-O-Si band were clearly visible, indicating the formation of a geopolymer gel. FTIR spectroscopy confirmed the correct composition of geopolymer concrete composites.

SEM micrographs are presented in Fig. 2 showing the microstructure of BFS-based geopolymer concretes. Fig. 2a demonstrates the spherical grains (5 – 30 μm) of fly ash in the geopolymer matrix. Fly ash particles remain intact in alkali-activated systems. Fig. 2b illustrates secondary crystalline products that have grown inside a pore of an alkaline-activated geopolymer rather than the primary geopolymer gel itself. In Fig. 2c, a partially reacted fly ash particle embedded in geopolymer gel is shown, highlighting an internal hollow structure and progressive infilling by reaction products. As can be concluded from these figures, the reacted geopolymer matrix was formed from BFS, whereas fly ash serves more as an aggregate than a binder.



a) b) c)

Fig. 2. SEM images of BFS-based geopolymers with scale bars: (a) 10 μm, (b) 5 μm, (c) 5 μm

Mechanical characteristics of the geopolymer concretes at the age of 7 days, namely density, compressive strength, and flexural strength, are presented in Table 2.

Table 2

Mechanical characteristics of the geopolymer concretes

Label	Density [kg/m^3]	Compressive strength, [MPa]	Flexural strength, [MPa]
GP_BFS	2,090	35.5	1.20
GP_BFS-Q25	1,985	36.6	1.25
GP_BFS-Q50	1,975	43.2	1.37
GP_BFS-RCA25	2,000	44.9	1.41
GP_BFS-RCA50	1,980	45.4	1.40
GP_BFS-FA25	1,770	11.8	0.33
GP_BFS-FA50	1,775	16.8	0.43

The identified properties of the developed geopolymer composites demonstrate strong mechanical performance, enabling their application in various construction uses. They also exhibit high sustainability, as the use of industrial waste materials and the potential for lower CO_2 emissions than conventional cement-based materialises industrial waste materials. Furthermore, the measured compressive strength values indicate promising mechanical performance for potential waste-storage applications; however, application-specific verification requires additional durability, leaching, and radiation-resistance testing. Additionally, given the known potential of geopolymer concretes to provide chemical, thermal, and radiation resistance, further testing of these parameters is recommended. Improvements aimed at increasing flexural strength through material modifications should also be considered to verify compliance with all optional requirements for manufacturing containers intended for the disposal of hazardous, toxic, and radioactive waste, as well as for use in nuclear facility construction.

Conclusion. Structural analyses performed in this study confirmed the successful formation of reactive aluminosilicate matrices, well-developed geopolymer gels, indicating effective solid-phase formation. Optimal geopolymer composites were developed based on blast furnace slag and fly ash with the addition of quartz sand and fine recycled concrete aggregate. The resulting geopolymer concretes were evaluated in terms of density, compressive strength, and flexural strength. Assessment of the mechanical properties of the aluminosilicate-based geopolymer composites showed compressive strength values ranging from 11.8 to 45.4 MPa. These results indicate promising potential for specialised construction and waste-management applications; however, further durability, leaching, and radiation-resistance testing is needed for application-specific assessment.

Acknowledgments. This work was supported by the Slovak Research and Development Agency under the Contract No. APVV-24-0133 and by the project Slovak Grant Agency VEGA (Grant 1/0278/25).

References

1. Luciano Sambataro, Facundo Bre, Neven Ukrainczyk, Eduardus A.B. Koenders, Environmental benchmarks for the European cement industry, *Sustainable Production and Consumption*, Volume 45, 2024, Pages 429-449, ISSN 2352-5509, https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.01.020.
2. Aperador W, Bautista-Ruiz J, Sánchez-Molina J. Geopolymers Based on a Mixture of Steel Slag and Fly Ash, Activated with Rice Husks and Reinforced with Guadua angustifolia Fibers. *Sustainability*. 2023; 15(16):12404. https://doi.org/10.3390/su151612404.
3. Mohammad Alameri, M.S Mohamed Ali, Mohamed Elchalakani, Abdul Sheikh, Optimizing slag-based geopolymer mix design for enhanced strength and durability, *Journal of Building Engineering*, Volume 100, 2025, 111770, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.111770.
4. Usman Javed, Faiz Uddin Ahmed Shaikh, Prabir Kumar Sarker, Thermal stability and strength degradation of lithium slag geopolymer containing fly ash and silica fume, *Construction and Building Materials*, Volume 425, 2024, 135976, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135976.
5. Steve W.M. Supit, Monita Olivia, Compressive strength and sulfate resistance of metakaolin-based geopolymer mortar with different ratio of alkaline activator, *Materials Today*: Proceedings, Volume 66, Part 5, 2022, Pages 2776-2779, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.514.
6. Jiarui Liu, Yidong Xu, Wensheng Zhang, Jiayuan Ye, Rui Wang, Solidification performance and mechanism of typical radioactive nuclear waste by geopolymers and geopolymer ceramics: A review, *Progress in Nuclear Energy*, Volume 169, 2024, 105106, ISSN 0149-1970, https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105106.
7. Council Directive 2011/70/Euratom of 19 July 2011 Establishing a Community Framework for the Responsible and Safe Management of Spent Fuel and Radioactive Waste. *Official Journal of the European Union* L 199 (2 Aug. 2011): 48–56.
8. Chystiakov, A., Kroviakov, S., Bershadskyi, A., Medveď, I., Slaný, M. (2026). Sustainable Effect of Using Recycled Aggregates for Road Concrete Production. In: *Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 113, pp 177-188. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-5069-9_16.

UDC 691.322:66.099.2

INFLUENCE OF BINDER TYPE AND GRANULATE PROCESS REGIME ON AGGREGATE PROPERTIES

Shevtsova M.[1,a,*], **Škamat J.**[1,b]

[1] *Laboratory of Composite Materials, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania*

[a] *PhD, Prof., Senior Researcher;* [b] *PhD, Assoc. Prof., Chief Research Fellow*

[*] *Corresponding author: maryna.shevtsova@vilniustech.lt*

Abstract. *Industrial dusts represent a heterogeneous and underutilized secondary resource. Their fine particle size, variable composition, and handling constraints necessitate stabilization before their reuse. This study investigates the granulation behavior of two industrial dust types-chamotte dust and stone wool production dust-using two liquid binders: sodium silicate (liquid glass) and a colloidal microsilica suspension (Lithosol 1540). Granulation was performed in an intensive mixer under controlled conditions, with constant rotational speeds and a liquid-to-solid ratio of 21–23 wt.%. The results demonstrate that dust type strongly influences granule growth mechanisms and achievable size distribution. Chamotte dust exhibits pronounced coalescence and forms coarse granules, particularly when liquid glass is applied, whereas stone wool dust produces finer and more uniform fractions. Binder selection significantly affects nucleation and consolidation mechanisms: sodium silicate promotes rapid agglomeration and enlargement, while colloidal silica enables more controlled growth and narrower particle size distributions. Increasing mixing time shifts the distribution toward larger fractions due to enhanced collision frequency and interparticle bonding. Scanning electron microscopy (SEM) reveals distinct differences in surface morphology and internal structure depending on binder type and granulation regime, confirming variations in particle packing and bonding mechanisms. Since density, permeability, and mechanical resistance are intrinsically governed by granule size and internal structure, control of granulation parameters enables targeted tailoring of functional characteristics. The findings provide a basis for rational design of dust-derived aggregates for construction and material engineering applications.*

Keywords: *industrial dust; granulation; particle size distribution; scanning electron microscopy (SEM); sustainable construction materials*.

Introduction. Industrial dusts generated from thermal and physicochemical processes exhibit significant compositional and morphological variability depending on their source, process conditions, and gas-cleaning technologies. Such materials may differ widely in particle size distribution, mineralogical composition, soluble salt content, and concentration of potentially hazardous components. Due to their fine particle size, high specific surface area, and frequent presence of soluble or reactive phases, many dusts require controlled handling, specialized storage conditions, and regulated operational procedures to prevent environmental contamination, dust

dispersion, or worker exposure. In particular, hygroscopicity, alkalinity, and leachable ionic species often impose restrictions on direct reuse or disposal [1, 2].

Despite these challenges, industrial dusts represent secondary mineral resources that can be valorized through appropriate stabilization and shaping technologies [3, 4]. Granulation is one of the most effective approaches for transforming fine particulate waste into mechanically stable and manageable granular products. The process reduces dustiness, improves handling characteristics, and enables further thermal or hydraulic treatment. Depending on the chosen liquid phase, granulation can be performed using simple systems such as water, water–cement suspensions, or lime-based binders, as well as more complex formulations including polymer-modified binders, alkaline activators, or specialized adhesive compositions. The nature and reactivity of the binder significantly influence interparticle bonding mechanisms, green strength development, and the subsequent evolution of the microstructure during curing or firing.

In addition to binder chemistry, the granulation regime—including liquid-to-solid ratio, mixing intensity, residence time, and drying conditions—strongly affects the nucleation and growth mechanisms of granules. By adjusting these parameters, it is possible to tailor particle size distribution, sphericity, internal porosity, density, and mechanical strength. As a result, granules with distinct geometrical characteristics and performance properties can be engineered from the same initial dust, depending on the selected processing pathway [5, 6].

The present study is devoted to the investigation of how binder type and granulation regime govern the structural development and properties of dust-derived aggregates. By analysing the interrelation between processing parameters, microstructural evolution, and functional characteristics, this work aims to establish rational principles for converting heterogeneous industrial dusts into value-added granular materials.

Materials and Methods. Two types of industrial dust were used as solid precursors for granulation: (i) chamotte dust originating from refractory processing, and (ii) mineral wool production dust collected from the manufacturing of stone wool insulation materials. Both materials are characterized by fine particle size and high specific surface area, which complicate direct handling and require agglomeration prior to further utilization. Granulation was performed using two different liquid binders:

- ✓ sodium silicate solution (Liquid glass, LG), serving as an inorganic alkaline binder;
- ✓ a microsilica suspension (MS), Lithosol® 1540, representing a colloidal silica-based binding system.

The use of these binders allows comparison between alkali-activated silicate bonding and silica sol-based particle consolidation mechanisms.

Granulation was carried out using a laboratory-scale intensive mixer/granulator, Eirich R02E. The liquid-to-solid ratio was maintained within the range of 21–23 wt.% for all compositions to ensure comparable granule formation conditions.

The principal granulation regime consisted of the following sequence:

- ✓ Dry mixing, performed with constant rotational direction of the mixing pan combined with cross-current movement of the mixing tools to ensure homogeneous particle distribution.
- ✓ Binder addition by spraying the liquid phase into the moving powder bed to promote uniform nucleation.
- ✓ Post-addition mixing, allowing granule growth through coalescence and layering mechanisms.

The rotational speeds of the mixing pan and tools were kept constant for all experimental series. The variables investigated were mixing time, binder type, and dust type, enabling the evaluation of their influence on granule formation, geometry, and resulting properties. The full list of granulation regimes of investigated samples is summarized in Table 1.

Table 1

Composition of samples (in mass%)

Sample	**Parameter of sample**		
	Dust	Binder	Time of granulation, min
CL5	Chamote	LG	5
CL3	Chamote	LG	3
CM5	Chamote	MS	5
ML5	Mineral wool	LG	5
MS5	Mineral wool	MS	5

Microstructure observation and composition analysis were carried out using scanning electron microscopy with a JSM-7600F SEM (JEOL) microscope equipped with an Oxford X-Max energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) system for providing the elemental composition of the sample.

Results and Discussion. The granulometric distribution presented in the Figure 1 demonstrates that particle size compositions are governed by the combined influence of dust type, binder nature, and granulation time. Clear differences are observed both in the dominant growth mechanism and in the degree of granule coarsening.

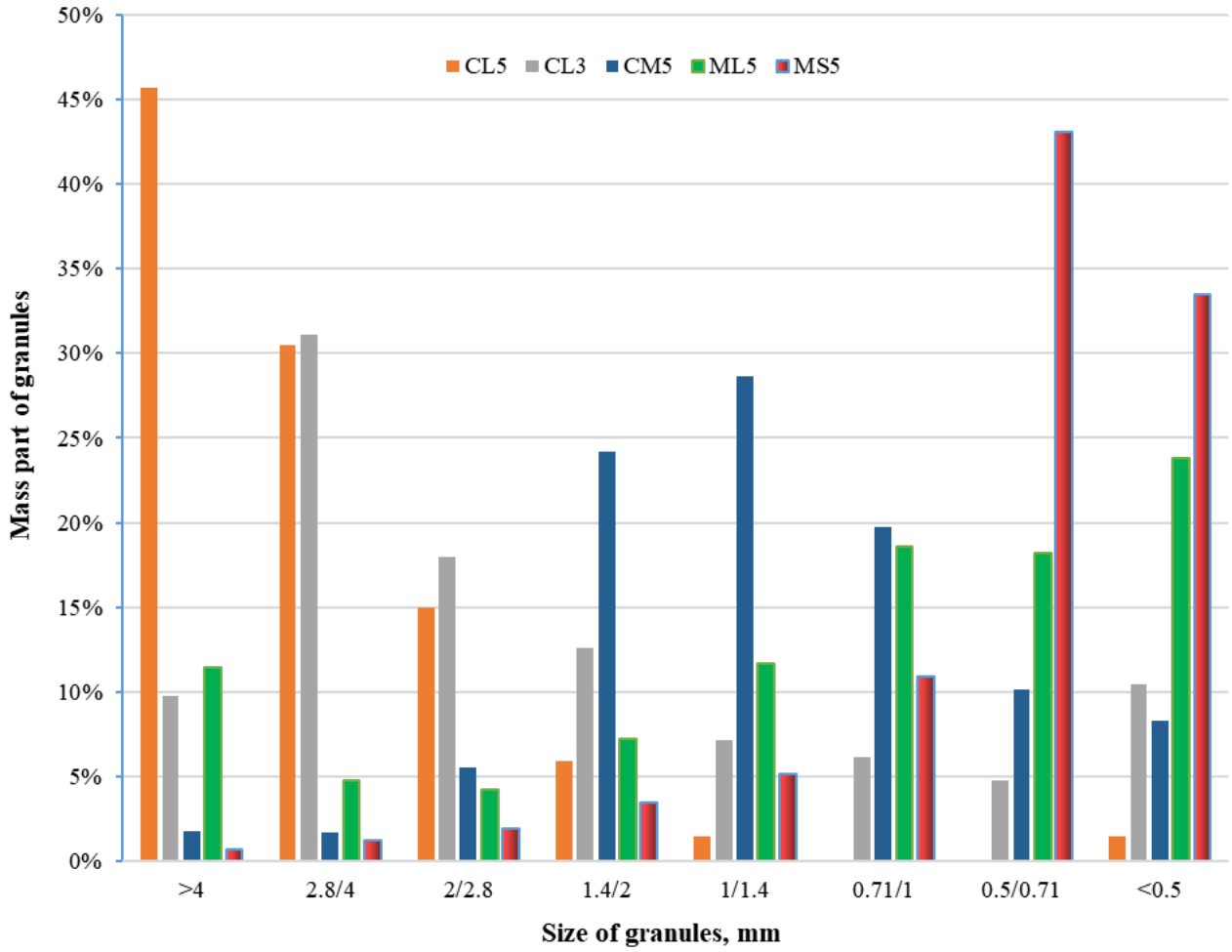


Fig. 1. The mass part of the granule size of aggregates after their production

Chamotte dust exhibits a strong tendency toward the formation of coarse fractions, particularly when liquid glass (LG) is used as the binder. In the chamotte + LG (5 min) system, the majority of material is concentrated in the 4 mm (~46%) and 2.8 mm (~30%) fractions, while the content of particles below 1 mm is minimal. This distribution indicates intensive granule growth dominated by coalescence and rapid consolidation. In contrast, when colloidal microsilica is applied (CM5), the size distribution shifts toward intermediate fractions (1.4–1 mm, ~24–29%), and the proportion of coarse particles decreases significantly. This suggests a more controlled growth mechanism, where layering and gradual build-up prevail over large-scale agglomeration. Dust derived from mineral wool production forms substantially finer granules regardless of binder type. This may be attributed to particle morphology and

lower packing density compared to chamotte dust. For ML5, the highest proportions are found in the 710 μm, 500 μm, and sub-500 μm fractions. This behavior reflects a lower tendency for large granule formation, likely associated with differences in particle morphology, density, and surface characteristics compared to chamotte dust (Fig.2).

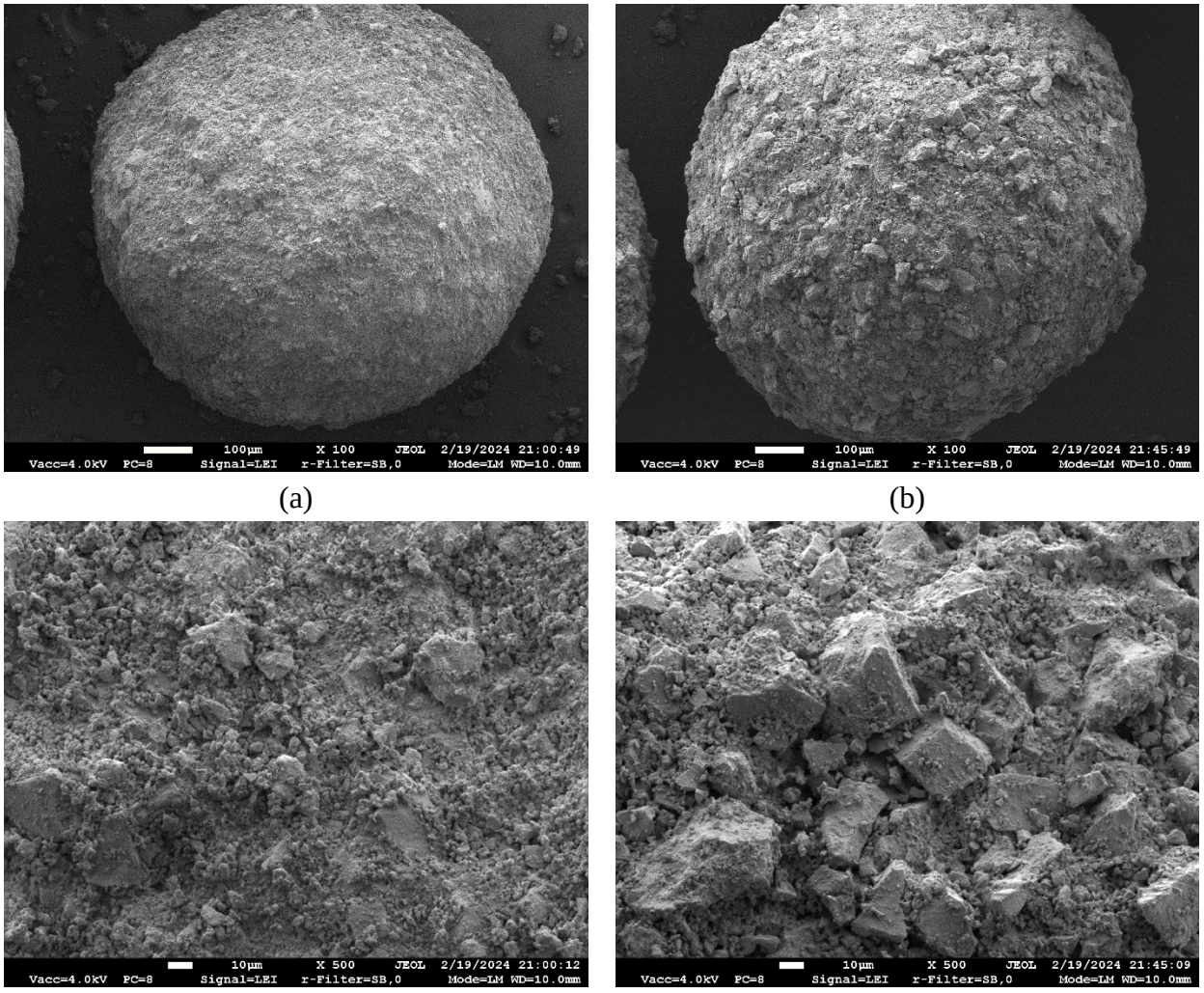
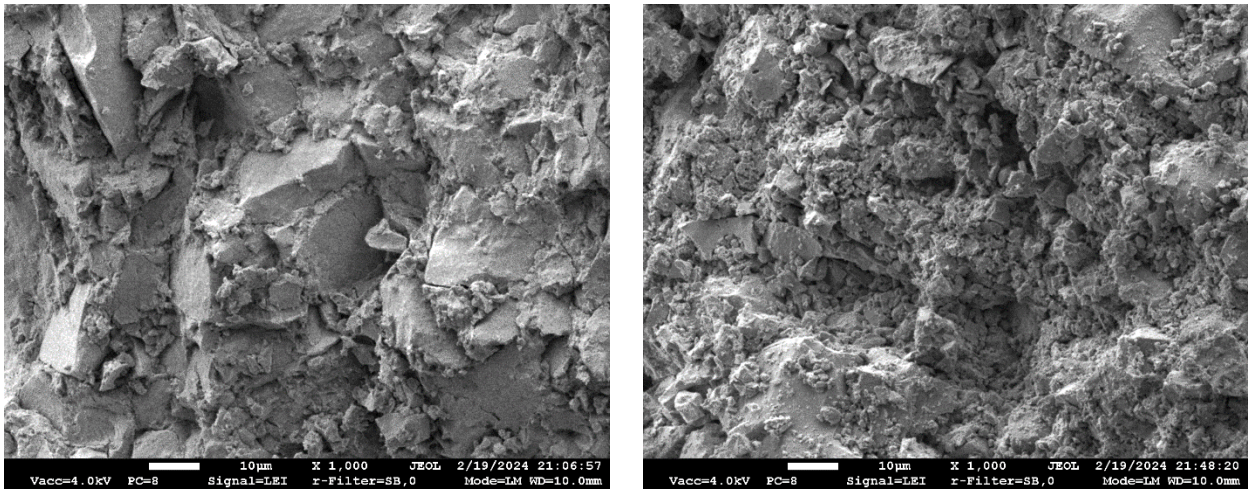


Fig. 2. Outside morphology of dispersive chamotte granules with microsilica suspension (a), (c) and with Liquid glass (b), (d)

Liquid glass promotes the formation of larger granules, especially in combination with chamotte dust. Its relatively high viscosity and rapid silicate gel formation enhance particle–particle bonding and favor coalescence-driven growth. microsilica suspension, in contrast, leads to a narrower and generally finer particle size distribution. The colloidal silica system appears to provide more uniform wetting and controlled interparticle bonding, limiting excessive coalescence and resulting in more homogeneous granule growth (Fig.2, Fig.3). Comparison of CL3 and CL5 shows that increasing granulation time shifts the distribution toward coarser fractions. Extended

mixing enhances collision frequency and coalescence probability, leading to progressive enlargement and densification of granules. At shorter mixing time (3 min), the distribution remains broader and centered in medium fractions (2–1.4 mm), corresponding to a nucleation-dominated stage with limited secondary growth.



(a) (b)

Fig. 3. Inside morphology of dispersive chamotte granules with microsilica suspension (a) and with Liquid glass (b)

Overall, dust type determines the inherent potential for granule growth and maximum attainable size. Binder chemistry controls the dominant growth mechanism (coalescence versus controlled layering). Longer granulation time promotes size enlargement and shifts the distribution toward coarser fractions. Thus, by adjusting dust type, binder system, and granulation duration, it is possible to tailor the geometrical composition of the produced granules.

Conclusion. The findings provide practical guidance for converting heterogeneous industrial dusts into value-added granular materials. By selecting appropriate binders and granulation regimes, it is possible to engineer aggregates with tailored size distributions and performance characteristics suitable for lightweight concrete, insulating backfill materials, or ceramic-based construction products. In particular, control of granule geometry and internal porosity enables adjustment of density, water absorption, and mechanical strength to meet specific application requirements. The results highlight the importance of integrating process parameters with microstructural evolution to achieve predictable material performance. This approach supports the development of sustainable material technologies by enabling the controlled valorization of industrial dust streams into functional construction materials.

References

1. Ribalta C., López-Lilao A., Estupiñá S., Fonseca A., Tobías A., García-Cobos A., Minguillón M., Monfort E., & Viana M. Health risk assessment from exposure to particles during packing in working environments. S*cience of The Total Environment,* 2019, 671, 474-487.
2. Shevtsova M., Malaiškienė J., Škamat J., Antonovič V., & Stonys R. Impact of Pre-Granulated MSWI Fly Ash on Hydration, Microstructure, and Performance of Portland Cement Mortars. *Applied Sciences*, 2025, 16(2), 725
3. Chen D., Zhang Y., Xu Y., Nie Q., Yang Z., Sheng W., & Qian G. Municipal solid waste incineration residues recycled for typical construction materials—A review. *RSC Advances*, 2022, 12(10), 6279.
4. Cases-Valbuena L., Terrados-Cristos M., Díaz-Piloñeta M., Álvarez-Cabal V., & Rey-Díaz A. Valorization pathways of industrial waste from the wind energy sector: A systematic review. *Sustainable Materials and Technologies*, 2026, 47, e01879.
5. Shevtsova M., Škamat J., Antonovič V., Stonys R., Kudžma A., & Skuodis Š. Influence of fireclay granules on calcium aluminate cement hydration and properties after firing. *Ceramics Internationa*l, 2025, 51(4), 5113-5124.
6. Shevtsova M., Malaiškienė J., Škamat J., & Antonovič V. Influence of Different Binders on the Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash Granulation-Based Stabilization Process. *Sustainability*, 2024, 17(10), 4573.

UDC 621.311.243:614.84

RISKS OF MODERN ENERGY TECHNOLOGIES: STATISTICAL AND PHYSICAL ASPECTS OF PV SYSTEM FIRES IN CENTRAL EUROPE

Michal Kupec[1,a,*], **Adela Palková**[1,b], **Milan Palko**[1,c]

[1] *Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia*

[a] *PhD student*; [b] *PhD, Assistant Professor;* [c] *PhD, Assoc. Prof.*

[*] *Corresponding author: michal.kupec@stuba.sk*

Abstract. *This paper analyses rising fire risks of PV panels on rooftops, comparing data from Czechia and Slovakia (2020-2024). Statistics reveal that fire frequency per 1 GW is outpacing new installations, nearly tripling in Czechia. The study combines a statistical evaluation – identifying electrical failures as the primary trigger – with a physical analysis of fire dynamics. A central focus is the "thermal canal" effect, where PV panels reflect radiative heat back onto the roof, accelerating pyrolysis and flame spread. Additionally, the paper addresses operational hazards for firefighters, including DC electrical risks and structural loads. The results emphasize the need for better data recording in Slovakia and improved fire-safety integration in construction physics to mitigate these evolving risks.*

Keywords: *PV fire safety, thermal canal effect, reradiation effect, PV fire statistics, PV fire causes*.

Introduction. PV panels are now a standard part of modern buildings, but they introduce new physical risks during a fire. Current construction safety rules often do not account for how these systems change heat flow on a roof. This study compares fire statistics from Czechia and Slovakia, showing a trend where fires are outrunning new installations. We specifically examine the "thermal canal" effect, where PV panels reflect radiative heat, causing rapid and dangerous flame spread. The goal is to identify the main technical causes of these fires and their impact on overall building safety.

Trends and Statistical Comparison. A comparison of data from Czechia and Slovakia (Table 1) shows a rising trend in PV panel fires. In Czechia, the number of fires per 1 GW nearly tripled (from 6.5 to 17.9). Slovakia shows a lot of variation, with a huge peak in 2023 (31.0). This suggests that fires are increasing faster than new installations, likely due to aging parts or poor installation quality. However, finding exact data is difficult because most countries do not keep specific records. This is a major problem especially in Slovakia, where statistics for small home systems are missing, making the current data incomplete.

Table 1

Fires and Installed Capacity in Czechia and Slovakia (2020-2024)

Country	Czechia			Slovakia		
Year	Number of Fires [1]	Installed Capacity [GW]	Fires per 1 GW	Number of Fires [2]	Installed Capacity [GW] [3]	Fires per 1 GW
2020	14	2,140 [4]	6,5	1	0,540	1,9
2021	15	2,200 [4]	6,8	8	0,545	14,7
2022	29	2,489 [5]	11,7	8	0,575	13,9
2023	11	3,454 [5]	15,9	26	0,840	31,0
2024	80	4,460 [6]	17,9	11	1,114	9,9

Causes of PV Fires. Analysing the technical causes of these incidents is crucial for understanding why fire trends are shifting. A comparison of data from Slovakia and Czechia shows that Electrical and PV Installation failures (such as short circuits or faulty wiring) are the leading risk factors (Table 2). This is especially evident in Czechia, where these failures account for more than half of all cases (54 %).

Table 2

PV Fire Causes in Czechia and Slovakia (2020-2024)

Cause of Fire	Czechia [%] [1]	Slovakia [%] [2]
PV Installation / Electrical	54	31
Unspecified Technical Faults / Other	23	48
Batteries / Storage	18	Included in “Other”
External Factors (Lighting, etc.)	3	2
Faulty Components (e.g., PV Panels)	4	Included in “Other”
Undetermined	-	6

The data highlights a significant difference in how fires are recorded between the two countries. In Czechia, PV battery storage systems are clearly identified as the cause in 18 % of cases. In contrast, Slovak statistics show a very high share of "Other or Unspecified" causes (48 %). This suggests that in Slovakia, specific triggers – like battery failures or aging parts – are not yet categorized separately in official records. This lack of detail confirms that current statistics, especially for small-scale systems, remain incomplete and harder to analyse. Meanwhile, external factors like lightning strikes remain a minor cause, representing less than 3 % of the total risk.

Fire Dynamics: The "Thermal Canal" Effect. The key factor in the change of fire risk is the presence of the panels themselves, which fundamentally alter the direction of heat flow. In the event of a fire, "flame deflection" occurs under the panels, returning a significant amount of heat back to the roofing surface. This mechanism also known as reradiation effect, creates a "thermal canal" under the panel that accelerates combustion. This hazardous process is illustrated by two distinct scenarios:

Scenario without panels (Figure 1): When a test wood crib is ignited on a standard roof structure, gases are gradually released from the heated membrane. However, since the heat can rise freely into the open space, there is almost no (or negligible) self-sustained flame spread beyond the original ignition source [7].

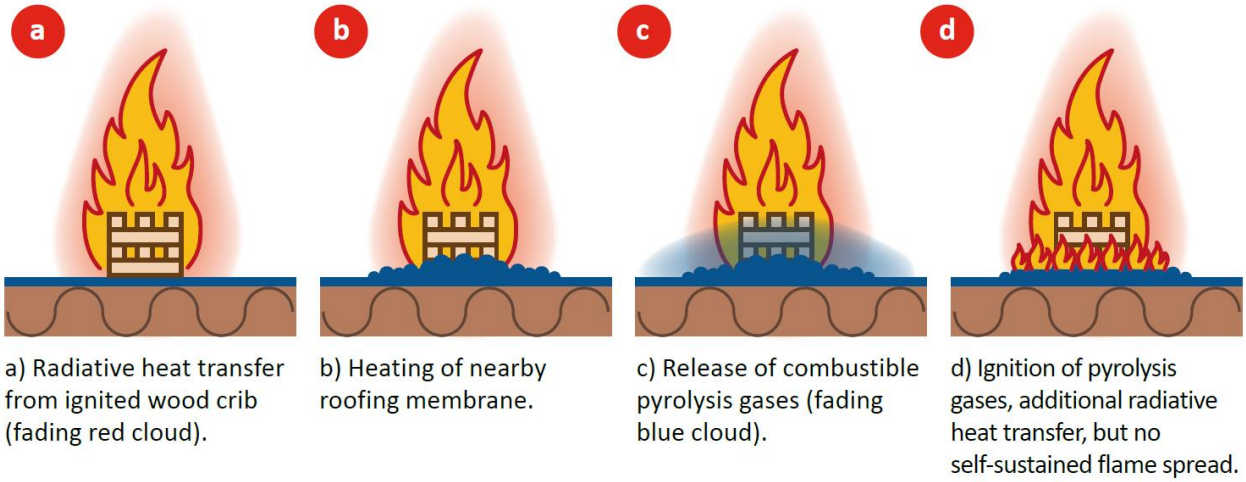


Fig. 1. Illustration of the ignition process for a wood crib on a roof structure (blue roofing membrane, brown insulation) [7]

Scenario with panels (Figure 2): The overlying panel acts like a lid that prevents heat from escaping. The increased radiative heat transfer back to the roof leads to a much more massive release of combustible pyrolysis gases from the insulation and membrane. This causes sustained and rapid fire spread even in areas where the flame would normally not spread at all (without panels) [7].

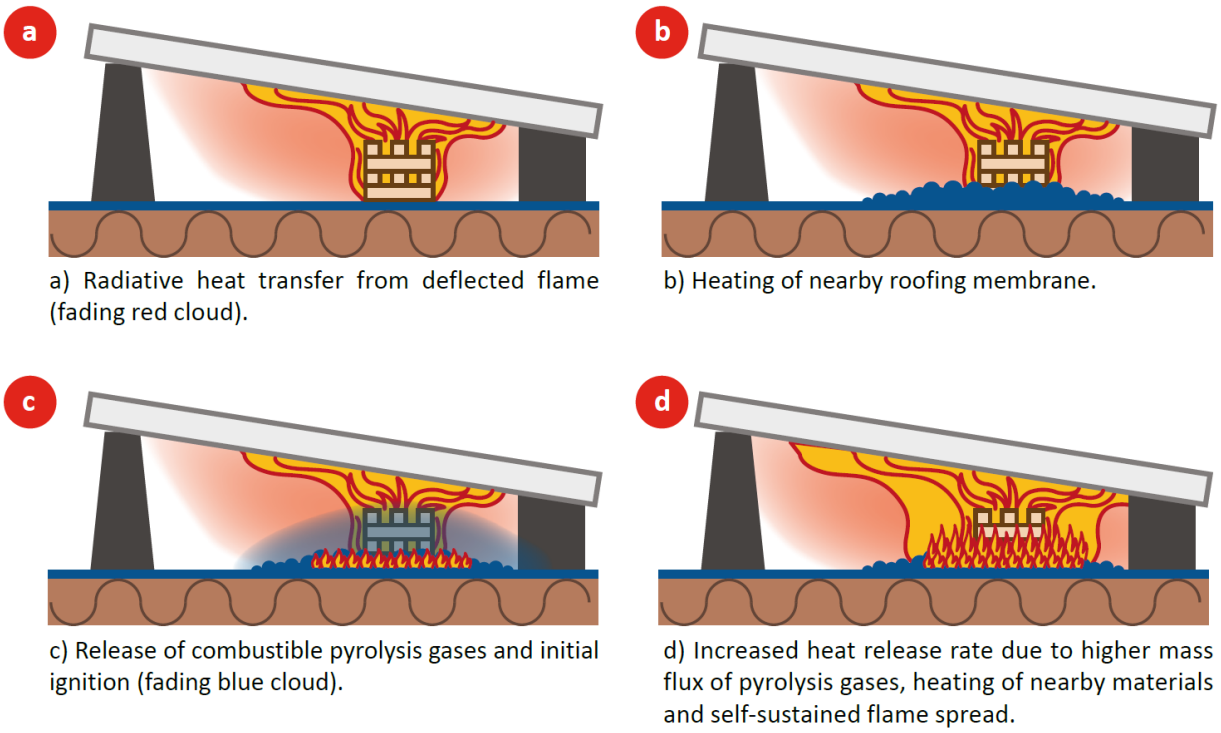


Fig. 2. Illustration of the ignition and flame spread process for a wood crib below a PV module (inclined grey rectangle) on a roof structure (blue roofing membrane, brown insulation) [7]

Operational Hazards for Firefighters. The presence of PV systems on a burning building introduces significant electrical and mechanical hazards. Since panels generate power as long as they are exposed to light, firefighters face a constant risk of electric shock from damaged modules, exposed DC wiring, or even through the conductivity of water streams. Furthermore, the glass surface of the panels is extremely slippery, and the physical layout of the arrays restricts movement and access on the roof [8].

Beyond direct contact, PV installations impact structural integrity and fire behaviour. The systems add a significant "dead load" to the roof, which can lead to a rapid structural collapse once the building is weakened by fire. Additionally, DC current can sustain stable electric arcs, which are harder to extinguish than AC faults and can continuously reignite surrounding materials [8].

Finally, PV systems complicate tactical operations and safety. The combustion of modules and batteries releases toxic chemical fumes, making the use of breathing apparatus (SCBA) mandatory. The panels also act as a physical barrier that prevents vertical ventilation, trapping heat and smoke inside the attic. This often forces fire services to adopt a defensive strategy, sometimes allowing the building to burn out under control to avoid risking personnel [8].

Results and Discussion. The analysis of fire incidents in Czechia and Slovakia reveals that the risk associated with PV systems is evolving faster than the pace of new installations. As shown in Table 1, the nearly threefold increase in fires per 1 GW in Czechia suggests that the issue is not merely the quantity of panels, but their aging and maintenance. In Slovakia, the extreme volatility of the data – particularly the peak in 2023 – highlights a significant gap in systematic record-keeping, especially for small-scale residential systems.

A critical finding in the Causes of PV Fires (Table 2) is the high percentage of electrical and installation failures (54 % in Czechia, 31 % in Slovakia). This confirms that human error during installation and the use of sub-standard components remain the primary ignition triggers. The lack of detailed categorization in Slovak statistics (where 48 % of causes are "Unspecified") masks specific risks, such as battery failures, which are already clearly visible in data from Czechia (18 %).

The discussion must also address how a PV system transforms a localized fire into a major structural threat. The "thermal canal" effect fundamentally changes fire dynamics; by acting as a "lid," the panels reflect radiative heat back onto the roof membrane. This triggers a massive release of pyrolysis gases, causing rapid, self-sustained fire spread that would not occur on a standard roof.

Consequently, these factors create a compounded risk for fire services. Firefighters are not only dealing with a more aggressive fire spread due to the thermal canal but are also hampered by "live" DC circuits, toxic fumes from batteries, and increased structural loads. The necessity of a "defensive strategy" (letting the building burn out) in certain cases proves that current PV installations can sometimes exceed the safe intervention limits of standard firefighting tactics.

Conclusion. This review confirms that the fire risk of PV panels is increasing faster than the number of new installations, with fire frequency per 1 GW nearly tripling in certain regions. The analysis shows that primary technical causes are installation and electrical failures. Physically, the "thermal canal" effect is the most critical factor, as it reflects radiative heat back onto the roof, leading to rapid flame spread. For practice, this highlights the urgent need for fire-resistant materials under PV panels and more detailed statistical tracking of fire causes to better understand evolving technological risks.

References

1. CKAIT. Analýza vývoje požárů staveb s fotovoltaickými elektrárnami. Z+i. 2025;3(1). [Online]. Available: https://zpravy.ckait.cz/vydani/2025-03/analyza-vyvoje-pozaru-staveb-s-fotovoltaickymi-elektrarnami/
2. Ministry of Interior of the SR**.** Fire Research and Expertise Institute. Internal fire statistics for 2024 [Internal document]. Bratislava: MV SR, 2025. Provided on Nov. 19, 2025SAPI. Slovak Market Outlook for Renewables 2025. Slovak Association of Photovoltaic Industry. 2025;1-12. [Online]. Available: https://www.sapi.sk/files/SlovakMarketOutlookforRenewables2025_SAPI_Light.pdf
3. Bhambhani A. Czech Republic Added 62 MW Solar In 2021. TaiyangNews. 2022. [Online]. Available: https://taiyangnews.info/markets/czech-republic-added-62-mw-solar-in-2021
4. Ministry of Industrial and Trade of Czech Republic. Od roku 2022 se v Česku připojilo přes 100 tisíc solárních elektráren. MPO ČR. 2024. [Online]. Available: https://mpo.gov.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/od-roku-2022-se-v-cesku-pripojilo-pres-100-tisic-solarnich-elektraren--slo-o-jeden-ze-slibu-vlady--279121
5. Energie.cz. Soláry v roce 2025 tolik nelákaly. Energie. 2026. [Online]. Available: https://www.energie.cz/solary-v-roce-2025-tolik-nelakaly/
6. FRISSBE. Publication of Building Applied Photovoltaics (BAPV) Fire Safety Guideline. ZAG News. 2025. [Online]. Available: https://www.frissbe.eu/news/publication-of-building-applied-photovoltaics-bapv-fire-safety-guideline
7. Namikawa S, Kinsey G, Heath GA, et al. Photovoltaics and Firefighters' Operations: Best Practices in Selected Countries. *NREL Technical Report*. 2017;TP-6A20-68415. [Online]. Available: https://docs.nlr.gov/docs/fy19osti/68415.pdf

УДК 691.3

ЗАХИСТ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ

Ющенко А. В.[1,a], **Анопко Д. В.**[1,b,*], **Бондаренко О. П.**[1,b]

[1] *Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна*

[a] *Студентка 3 курсу;* [b] *Канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів*

[*] *Автор для листування: anopko1973@gmail.com*

Анотація. *Застосування більшого відсотка захищеного обладнання, дасть можливість збільшити між ремонтні інтервали, покращити якість продукції, зменшити витрати на ремонт та заміну обладнання. Високоміцні бетон є високоефективним конструкційним матеріалом, властивості якого можна контролювати в досить великих межах і використовувати як матеріал захисту. У високоміцних бетонах оптимізовані основні параметри, що впливають на міцність бетону: високоміцний цемент, фракціонований заповнювач з високою ударною в'язкістю, фібра для мікроармування бетонної конструкції і запобігання утворенню тріщин, підвищена термостійкість композиту. Збільшення якісних показників високоміцного бетону в порівнянні зі звичайним бетоном визначається наступними показниками: збільшення міцності на розтяг – в 2,5 рази; збільшення ударної в'язкості – в 10 разів; збільшення тріщиностійкості – в 5…6 разів.*

Ключові слова: *високоміцний бетон; покриття, зносостійкість, захист, стираність*.

PROTECTION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT USING HIGH-STRENGTH CONCRETES

Yushchenko A. V.[1,a], **Anopko D. V.**[1,b,*], **Bondarenko O. P.**[1,b]

[1] *Kyiv National University of Construction and Architecture (KNUCA), Kyiv, Ukraine*

[a] *3rd-year student;* [b] *PhD, Assoc. Prof. at the Dept. of Building Materials*

[*] *Corresponding author: anopko1973@gmail.com*

Abstract. *The use of a larger percentage of protected equipment will make it possible to increase the repair intervals, improve product quality, reduce the cost of repair and replacement of equipment. High-strength concrete is a highly effective structural material, the properties of which can be controlled within fairly large limits and used as a protective material. In high-strength concrete, the main parameters that affect the strength of concrete are optimized: high-strength cement, fractionated aggregate with high impact strength, fiber for micro-reinforcement of the concrete structure and prevention of cracking, increased thermal resistance of the composite. The production of high-strength concrete is only possible in conditions of high production culture with the provision of technology for the preparation and dosing of aggregates, cement, additives from*

dispersed mineral and polymer components, which allow predicting and regulating the physicochemical processes of interaction and structure formation.

Keywords: *high-strength concrete; coating; wear resistance; protection; abrasion resistance*.

Актуальність дослідження. Аналіз роботи підприємств цементної промисловості, а також підприємств інших галузей, де обладнання піддається інтенсивному абразивному зносу, впливу агресивних середовищ і високих температур, показав, що більшість поверхонь обладнання не захищені або захищені низькоефективними матеріалами від руйнівного впливу робочого середовища, при цьому більше 90% площі обладнання і споруд працюють при тиску менше 5 МПа. Застосування більшого відсотка захищеного обладнання, дасть можливість збільшити між ремонтні інтервали, покращити якість продукції, зменшити витрати на ремонт та заміну обладнання. На цементних заводах – шихтові бункери, жолоби, мультициклони, циклони, газоходи брудного газу, колектори, скрубери, шламові трубопроводи, жолоби, покриття підлоги промислових будівель. На гірничо-збагачувальних комбінатах і вуглезбагачувальних фабриках – бункери руди і коксової шихти, жолоби живильники, приймачі вакуум-фільтрів для шламів, контактні ємності для підготовки шламів до флотації, гідроциклони, пульпопроводи, шламопроводи, на конвеєрах подачі вугільного концентрату, трубопроводи гідровидобутку [1-3].

Стан проблеми. Бетони, які використовуються для виготовлення зносостійких покриттів, значно відрізняються від тих, які використовуються в житловому і промисловому будівництві. Звичайний товарний бетон – крихкий матеріал, тобто при досягненні руйнівного навантаження відбувається його раптове руйнування. При використанні бетону в захисному шарі він повинен витримувати спрямовані динамічні впливи, стирання, стискання, різання та нагрівання [4-6]. Від того, наскільки враховані умови роботи захисного шару, буде залежати його ефективність.

Метою роботи є провести комплекс досліджень властивостей високоміцних бетонів на спеціальних заповнювачах, які можуть бути використані для захисту технологічного обладнання.

Отримані результати. Було досліджено кінетику набору міцності бетону на стиск протягом 1 року тверднення в природному (W=100 % та t=20+2 ºС) та водному середовищі. Аналізуючи результати досліджень можна відзначити, що у водних умовах бетони тверднуть інтенсивніше, ніж на повітрі, що узгоджується з відомими результатами досліджень [4-7]. Міцність при стиску матеріалів різних складів при однаковій зручності укладання суміші зростає при зменшенні

вмісту дисперсного заповнювача (склад 4). Цього ж можна досягти при використанні менш дисперсного заповнювача (кальціонованого бокситу, склади 2-4). Зазначимо, що бетони складу 4 віком 28 діб мають найвищу міцність.

На основі розробленого композитного цементу були призначені склади дрібнозернистих бетонів і досліджені наступні властивості: міцність на розтяг при стиску, згині, розтягу, водопоглинання, водонепроникність, морозостійкість, зносостійкість, міцність анкерування арматури в бетоні, міцність і деформативність композиту при дії як короткочасного так і довготривалого навантаження. Дослідження фізико-механічних властивостей бетонів виконували на складах 1…5 (табл. 1).

Таблиця 1

Склади бетону на основі кальціонованого бокситу і композитного цементу

№ п/п	Склади бетону, мас. %	Співвідношення в'яж./зап.	Середня густина, кг/м^3
1	Композитний цемент – 65 Кальцінований боксит (0,08…0,16мм) – 35	2:1	2150
2	Композитний цемент – 50 Кальцінований боксит (0,08…0,16мм) – 50	1:1	2350
3	Композитний цемент – 35 Кальцінований боксит (0,08…0,16мм) – 65	1:2	2640
4	Композитний цемент – 35 Кальцінований боксит (0,8…2,5мм) – 65	1:2	2710
5	Композитний цемент – 50 Кальцінований боксит (0,8…2,5мм) – 50	1:1	2420

Результати дослідження залежності міцності бетону на стиск від водоцементного відношення наведено в табл. 2. Аналізуючи отримані результати, слід зазначити, що розроблені бетони мають середню міцність на стиск 120…130 МПа, збільшення В/Ц веде до зниження міцності.

Таблиця 2

Залежність міцності бетону при стиску від водоцементного відношення

Склад бетону за табл. 1	Водоцементне співвідношення	Середня міцність при стиску, МПа
1	0,28 0,31 0,34	135 130 125
2	0,32 0,35 0,38	130 125 120
3	0,28 0,31 0,34	132 135 130
4	0,27 0,30 0,33	142 135 130
5	0,27 0,30 0,33	137 132 125

Результати визначення міцності зразків бетону при згині наведені в табл. 3. Аналізуючи отримані результати можна зробити такі висновки. Зі зростанням В/Ц, як відомо міцність матеріалу знижується. Використання суперпластифікатора дозволяє знизити В/Ц та підвищити міцність бетону. Співвідношення між міцністю на стиск і міцністю на розтяг при згині приблизно становить 14…16 МПа і збільшується зі зростанням В/Ц. Збільшення кількості кальціонованого бокситу (дрібної фракції) у бетоні майже не відбивається на його міцності при згині. Отриманий результат може бути пояснений особливостями фазового складу цементу, що твердне.

Як встановлено [7], при твердненні композиційного цементу утворюється значна кількість високоосновних алюмовмісних сполук типу етрингіту. Останні мають довгу форму і можуть виконувати на мікрорівні роль мікроармуючого елемента, який підвищує міцність на розтяг. Цей висновок підтверджується порівнянням результатів випробувань бетонів на кальціонованому бокситі із міцністю матеріалів на електрокорунді. В останньому випадку при однаковому В/Ц міцність матеріалу з електрокорундом на розтяг при згині менше порівняно

з міцністю матеріалу на кальціонованому бокситі. Підтвердженням зроблених висновків є результати випробувань бетону на розтяг при згині.

Таблиця 3

Міцність бетонів на розтяг при згині

Склад бетону за табл. 1	Середня міцність на розтяг при згині, МПа	В/Ц	Співвідношення міцності на стиск до міцності на розтяг	Клас бетону за міцністю на розтяг при згині
1	8,9…9,2	0,28	14,6	B_{tb}6,8
	7,5…7,9	0,31	16,4	B_{tb}5,6
	6,5…7,0	0,34	17,8	B_{tb}4,8
2	8,4…8,8	0,32	14,7	B_{tb}6,4
	7,4…7,6	0,35	16,4	B_{tb}5,6
	6,4…6,8	0,38	17,6	B_{tb}4,8
3	11,5…11,7	0,28	11,3	B_{tb}8,0
	10,2…10,5	0,31	12,8	B_{tb}7,2
	6,8…7,2	0,34	18,0	B_{tb}4,8
4	9,0…9,3	0,27	15,2	B_{tb}6,8
	8,0…8,3	0,3	16,3	B_{tb}6,0
	6,8…7,2	0,33	18,0	B_{tb}5,2
5	8,5…9,0	0,27	15,2	B_{tb}6,4
	7,5…8,0	0,3	16,5	B_{tb}5,6
	6,4…6,8	0,33	18,3	B_{tb}4,8

Висновки.

Таким чином, виробництво високоміцних бетонів можливо тільки в умовах високої культури виробництва з наданням технології підготовки і дозування заповнювачів, цементу, добавок з дисперсних мінеральних і полімерних компонентів, які дозволяють прогнозувати і регулювати фізико-хімічні процеси взаємодії і структуроутворення. Збільшення якісних показників високоміцного бетону в порівнянні зі звичайним бетоном визначається наступними показниками: збільшення міцності на розтяг – в 2,5 рази; збільшення ударної в'язкості – в 10 разів; збільшення тріщиностійкості – в 5…6 разів. За своїми властивостями міцності вироби, виготовлені з використанням високоміцного бетону (футеровані труби, відводи, трійники, хрестовини, жолоби), витримують навантаження, що значно перевищують 5 МПа і тому можуть широко застосовуватися для захисту обладнання від абразивного зносу, впливу

агресивних середовищ і високих температур, що підтверджується багаторічною практикою експлуатації таких виробів в різних галузях промисловості, забезпечуючи збільшення терміну служби обладнання в 2…6 разів.

Література

1. Желібо Є.П., Анопко Д.В., Буслик В.М., Овраменко М.А. Основи технологій виробництва в галузях народного господарства, Київ: Кондор, 2005. 716 с.
2. Світлий Ю.Г., Білецький В.С. Гідравлічний транспорт: Монографія, Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. 436 с.
3. Світлий Ю.Г., Круть О.А. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів. Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. 268 с.
4. Martinella R. Selection and application of wear-resistant materials to increase service life of components. Ceramics International. 1993. Vol. 19. №6.
5. Hutchings I.M. Wear-resistant materials: into the next century. Materials Science and Engineering A. 1994. Vol. 184. №2.
6. Fischer A. Well-founded selection of materials for improved wear resistance. Wear. 1996. Vol. 194. №1-2.
7. Yoo D.-Y., Banthia N. Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 73. P. 267-280.

References

1. Zhelibo, E.P., Anopk,o D.V., Buslyk, V.M., Ovramenko, M.A. (2005). Fundamentals of production technologies in sectors of the national economy. Kyiv: Condor, 716 p.
2. Svitly, Yu.G., Biletsky, V.S. (2009). Hydraulic transport: Monograph, Donetsk: Skhidnyi vydavnichy dim, 436 p.
3. Svitly, Yu.G., Krut, O.A. (2010). Hydraulic transport of solid materials. Donetsk: Skhidnyi vydavnichy dim, 268 p.
4. Martinella, R. (1993). Selection and application of wear-resistant materials to increase service life of components. Ceramics International, 19, 6.
5. Hutchings, I.M. (1994). Wear-resistant materials: into the next century. Materials Science and Engineering A., 184, 2.
6. Fischer, A. (1996). Well-founded selection of materials for improved wear resistance. Wear, 194, 1-2.
7. Yoo, D.-Y., Banthia, N. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. Cement and Concrete Composites, 73, 267-280.

УДК 621.78-978.004.94

ЕВОЛЮЦІЯ КЛАСТЕРІВ ДЕФЕКТІВ У Fe-Cu СПЛАВІ ПРИ ОПРОМІНЕННІ ТА ВІДПАЛІ

Сівак І.С.[1,a], **Гохман О.Р.**[1,b,*]

[1] *Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського, Одеса, Україна;*

[a] *аспірант кафедри прикладної математики та інформатики;* [b] *Д-р фіз.-мат. наук, професор кафедри прикладної математики та інформатики*

[*] *Автор для листування: alexander.gokhman@gmail.com*

Анотація. *У роботі досліджено еволюцію кластерів дефектів у Fe–Cu сплаві під час нейтронного опромінення та подальшого термічного відпалу. Показано, що під час опромінення у матеріалі відбувається формування мідь-збагачених преципітатів, які призводять до збільшення границі текучості матеріалу. Проаналізовано зміну середнього радіуса та об'ємної частки преципітатів залежно від часу опромінення. Встановлено, що термічний відпал сприяє зменшенню концентрації дефектних кластерів мідь-збагачених преципітатів та частковому відновленню механічних властивостей сплаву.*

Ключові слова: *Fe–Cu сплав, кластери дефектів, мідь-збагачені преципітати, нейтронне опромінення, термічний відпал, радіаційне зміцнення.*

EVOLUTION OF DEFECT CLUSTERS IN Fe-Cu ALLOY DURING IRRADIATION AND THERMAL ANNEALING

Sivak I. S.[1,a], **Gokhman A. R.**[1,b]

[1] *South Ukrainian National Pedagogical University named after K. D. Ushynsky, Odesa, Ukraine*

[a] *PhD student at the Dept. of Applied Mathematics and Computer Science;* [b] *DsC, Prof. at the Dept. of Applied Mathematics and Computer Science*

[*] *Corresponding author: alexander.gokhman@gmail.com*

Abstract. *The evolution of defect clusters in Fe–Cu alloy during neutron irradiation and subsequent thermal annealing was investigated. It was shown that irradiation leads to the formation of copper-rich precipitates that significantly affect the mechanical properties of the material. The dependence of the mean precipitate radius and their volume fraction on irradiation time was analyzed. The obtained results demonstrate that the formation of copper-rich precipitates leads to radiation hardening and an increase in the yield strength of the alloy. It was also found that thermal annealing promotes partial dissolution of defect clusters and a decrease in their concentration, which results in partial recovery of the mechanical properties of the material.*

Keywords: *Fe–Cu alloy, defect clusters, copper rich precipitates, neutron irradiation, annealing, radiation hardening*.

Актуальність дослідження. У процесі експлуатації матеріалів у ядерній енергетиці під дією нейтронного опромінення відбувається суттєва зміна їх мікроструктури. Формування точкових дефектів та преципітатів домішкових елементів призводить до зміни механічних властивостей матеріалу, зокрема до підвищення границі текучості та зниження пластичності. Ці процеси мають складний багатомасштабний характер і визначають довговічність та надійність конструкційних матеріалів ядерних реакторів.

Актуальним завданням сучасного матеріалознавства є встановлення закономірностей формування та еволюції дефектної структури матеріалів під дією опромінення, а також дослідження процесів відновлення їх властивостей під час термічного відпалу. Аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень показує, що ключову роль у зміні механічних властивостей матеріалів відіграють кластери точкових дефектів і преципітати домішкових елементів. Їх утворення та розвиток визначають механізми радіаційного зміцнення та окрихчення матеріалів.

Стан проблеми. У даний час активно розвивається фізичний підхід до опису радіаційних пошкоджень матеріалів, який базується на використанні фізичних теорій пластичності та кінетичних моделей еволюції дефектів. У рамках цього підходу розглядаються механізми утворення та росту кластерів вакансій, міжвузлових атомів та преципітатів домішкових елементів у металах та сплавах.

Особливий інтерес становлять Fe–Cu сплави, які є моделлю для дослідження процесів радіаційного зміцнення корпусних сталей водо-водяних реакторів (ВВЕР) [1,2]. Під час нейтронного опромінення у таких матеріалах відбувається утворення мідь-збагачених преципітатів, що істотно впливають на механічні властивості матеріалу.

Незважаючи на значну кількість експериментальних робіт, механізми еволюції кластерів дефектів та їх вплив на зміну границі текучості матеріалу залишаються недостатньо дослідженими. У зв’язку з цим значного поширення набули методи комп’ютерного моделювання, зокрема метод кластерної динаміки [3], який дозволяє описувати процеси утворення та розвитку дефектної структури матеріалу під час опромінення та подальшого відпалу [3,4].

Мета роботи. Дослідження еволюції кластерів дефектів у Fe–Cu сплаві під час нейтронного опромінення та подальшого термічного відпалу, а також оцінка впливу цих процесів на зміну механічних властивостей матеріалу.

Отримані результати. Досліджувався Fe–Cu сплав, хімічний склад якого представлено у таблиці 1. Вміст міді у досліджуваному сплаві становить 0,42 мас. %, що дозволяє дослідити процеси утворення та розвитку мідь-збагачених преципітатів під дією нейтронного опромінення.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваного Fe–Cu сплаву (мас. %)

C	S	Cu	P	Ni	Si	Mn
0,01	0,05	0,42	0,012	0,01	0,24	0.49

Опромінення зразків здійснювалося у реакторі типу ВВЕР-440 при температурі 543 К до дози 0,01 dpa. Після опромінення проводився термічний відпал зразків при температурах 548-728 К протягом 5-100 годин.

Для теоретичного аналізу еволюції дефектної структури матеріалу було використано метод кластерної динаміки, який дозволяє описати кінетику утворення та росту мідь-збагачених преципітатів. Розрахунки проводилися шляхом інтегрування системи диференціальних рівнянь, що описують зміну концентрацій дефектів та їх кластерів у часі.

Отримані результати показали, що під час опромінення у матеріалі відбувається формування мідь-збагачених преципітатів, середній радіус яких поступово зростає зі збільшенням часу опромінення (Рис.1). При цьому об’ємна частка преципітатів (C_V) швидко збільшується на початкових стадіях опромінення, після чого процес переходить у стадію їх укрупнення (стадія Оствальда), при якій зріст C_V уповільнюється Рис.2).

У [5] було встановлено, що утворення таких преципітатів призводить до збільшення границі текучості матеріалу. На Рис.3 наведено залежність зміни границі текучості дослідженого сплаву Fe–Cu від часу опромінення. Видно, що зі збільшенням часу опромінення границя текучості матеріалу зростає.

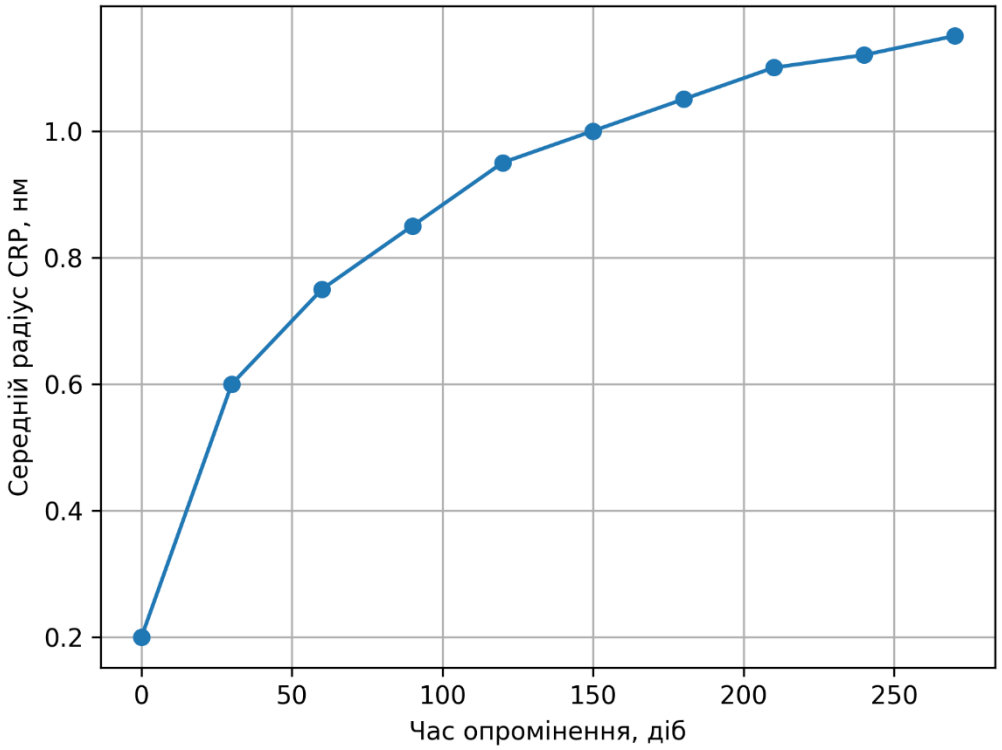


Рис.1. Залежність середнього радіуса мідь-збагачених преципітатів у Fe–Cu сплаві від часу опромінення

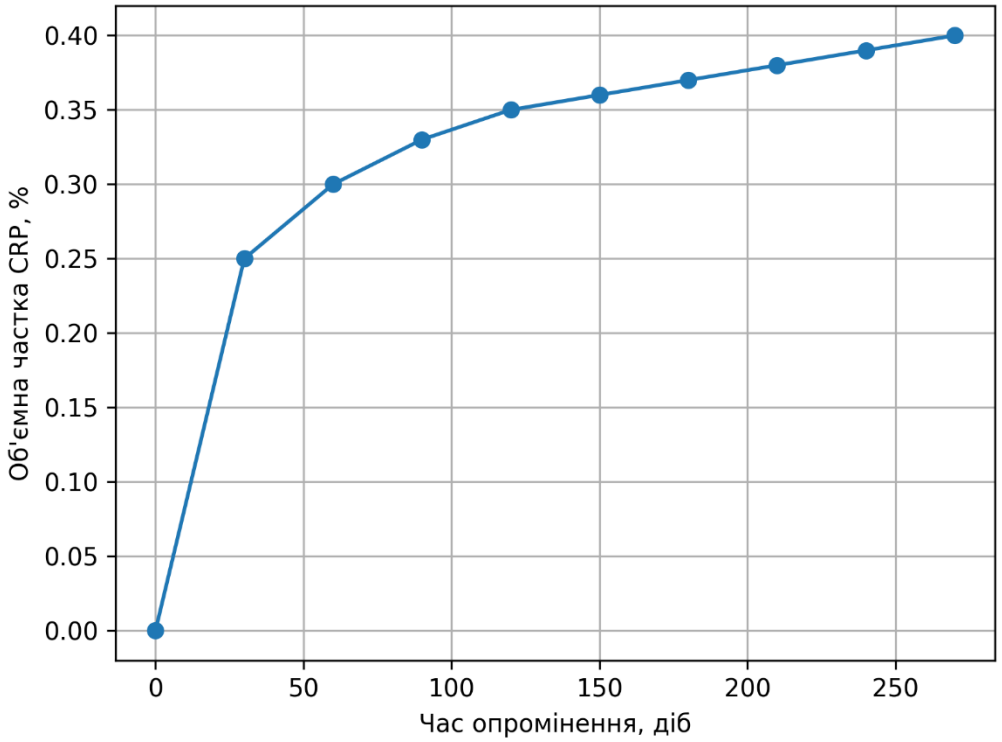


Рис.2. Залежність об’ємної частки мідь-збагачених преципітатів у Fe–Cu сплаві від часу опромінення

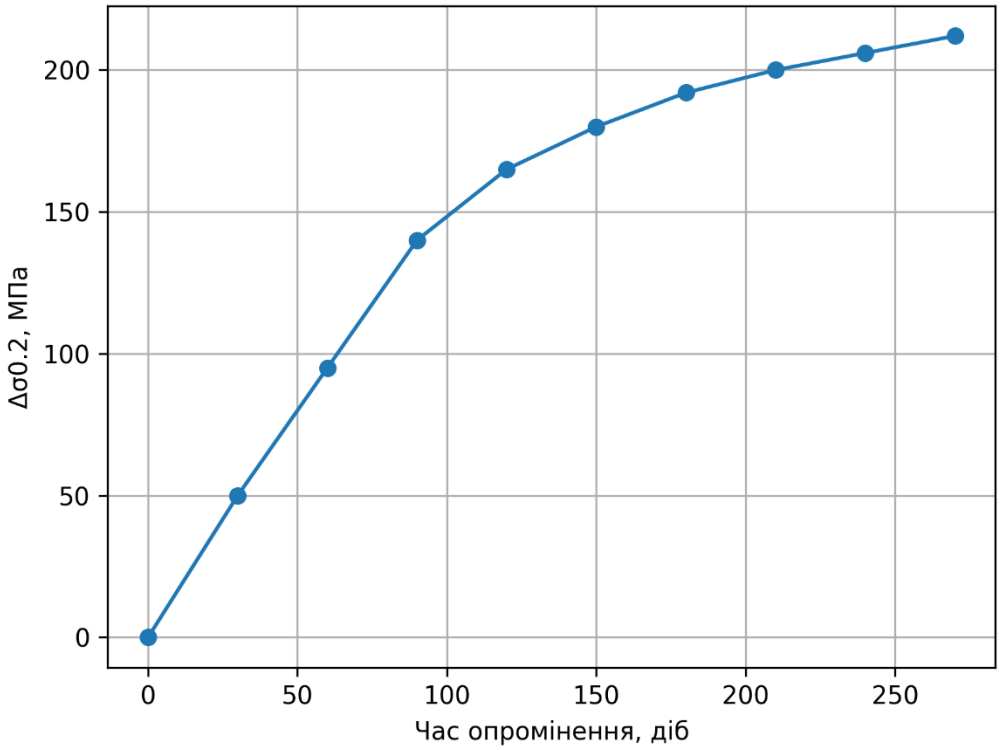


Рис.3. Зміна границі текучості Fe–Cu сплаву залежно від часу опромінення

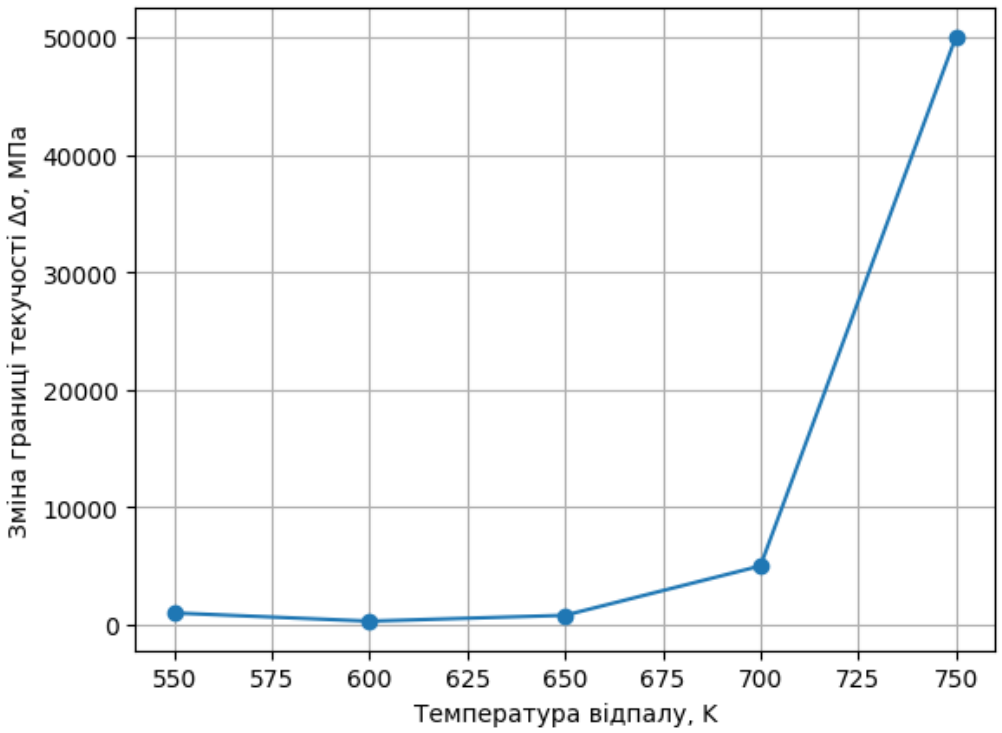


Рис.4. Зміна границі текучості Fe–Cu сплаву залежно від температури відпалу для часу відпалу 100 годин

Отримані результати узгоджуються з результатами експериментальних та теоретичних досліджень, представлених у роботах [1–4], де також показано, що основним механізмом радіаційного зміцнення Fe–Cu сплавів є формування мідь-збагачених преципітатів.

Подальший термічний відпал сприяє зменшенню концентрації дефектних кластерів та частковому відновленню механічних властивостей матеріалу. Встановлено, що термічний відпал суттєво впливає на дефектну структуру та механічні властивості сплаву: при температурі близько 548 K та часу відпалу 100 годин відбувається ефективне відновлення матеріалу (Рис.4, 5).

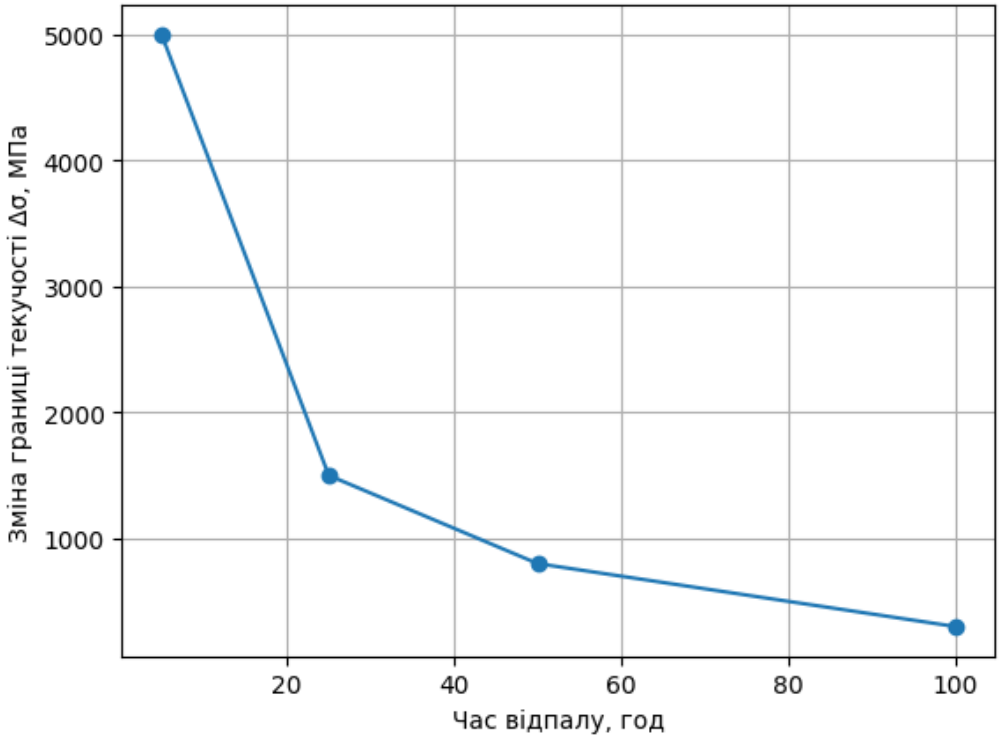


Рис.5. Зміна границі текучості Fe–Cu сплаву залежно від часу відпалу при температурі відпалу 548К

Висновки. У ході дослідження було проаналізовано еволюцію кластерів дефектів у Fe–Cu сплаві під час нейтронного опромінення та подальшого термічного відпалу. Отримані результати показали, що під час опромінення у матеріалі відбувається формування мідь-збагачених преципітатів, які суттєво впливають на механічні властивості сплаву.

Встановлено, що зі збільшенням часу опромінення зростає як середній радіус преципітатів, так і їх об’ємна частка. Це призводить до підвищення границі текучості матеріалу та прояву ефекту радіаційного зміцнення.

Показано, що процес формування преципітатів має багато стадійний характер. На початкових етапах опромінення відбувається інтенсивне утворення нових кластерів, тоді як на пізніших стадіях домінує процес їх укрупнення.

Отримані результати можуть бути використані для прогнозування зміни механічних властивостей матеріалів корпусів реакторів типу ВВЕР-440 під час тривалої експлуатації та у процесі відпалу.

Література | References

1. Debarberis L., Acosta B., Zeman A. Radiation stability of reactor pressure vessel materials. *Scripta Materialia*, 2005.Vol. 53. P. 769–773.
2. Brumovsky M. et al. Annealing and re-embrittlement of reactor pressure vessel materials. – JRC Report EUR 23449 EN, 2008.
3. Gokhman A., Bergner F. Cluster dynamics simulation of point defect clusters in neutron irradiated iron. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 2010, Vol. 165, No. 3, pp. 216–226.
4. Christien F., Barbu A. Modelling of copper precipitation in iron during irradiation. *Journal of Nuclear Materials*, 2004. Vol. 324, No. 1, pp. 90–102.
5. Russell K., Brown L. A dispersion strengthening model applied to the iron–copper system. *Acta Metallurgica*, 1972. Vol. 20, No. 7, pp. 969–974.

УДК 699.86:536.2

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНО-МАТЕРІАЛЬНИХ МОДИФІКАЦІЙ НА ТЕПЛОТЕХНІЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ СТІНОВИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЖИТЛА В УКРАЇНІ

Башинська Є. І.[1,a], **Олійник Т. П.**[1,b,*]

[1] *Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна*
[a] *Студентка 2 курсу;* [b] *Канд. хім. наук, доцент кафедри хімії*
[*] *Автор для листування: tanoley@gmail.com*

Анотація. *У роботі запропоновано двоступеневу модель оптимізації стінових систем для післявоєнного відновлення житла в Україні з урахуванням конструктивно-матеріальних модифікацій. Розглянуто автоклавний газобетон, керамічний блок і префабриковану каркасно-панельну систему як інноваційний контрольний варіант. Критерії оцінювання нормовані у відносній шкалі [0; 1]. Для згортки критеріїв використано адитивну схему та метод зваженого середнього геометричного; останній рекомендується як основний завдяки кращому врахуванню некомпенсованості показників. Запропоновано коригування на основі матриці коваріацій для обліку сильної кореляції критеріїв. Розрахункова апробація підтвердила, що конструктивно-матеріальні модифікації підвищують ефективність традиційних стінових систем, а найвищий інтегральний показник має префабрикована каркасно-панельна система.*

Ключові слова: *стінові системи, теплозахист, довговічність, конструктивно-матеріальна модифікація, нормовані критерії, післявоєнне відновлення житла, оптимізація.*

MODELING THE IMPACT OF STRUCTURAL AND MATERIAL MODIFICATIONS ON THE THERMOTECHNICAL EFFICIENCY AND DURABILITY OF WALL SYSTEMS FOR HOUSING RECOVERY IN UKRAINE

Bashynska Ye. I.[1,a], **Oliynyk T. P.**[1,b,*]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*
[a] *2nd-year student;* [b]*PhD, Assoc. Prof. at the Dept. of Chemistry*
[*] *Corresponding author: tanoley@gmail.com*

Abstract. *This study proposes a two-stage optimization model for wall systems intended for the post-war housing recovery in Ukraine, taking into account structural and material modifications. Autoclaved aerated concrete, ceramic block masonry, and a prefabricated frame-panel system used as an innovative reference option were considered. The evaluation criteria were normalized on a*

relative scale of [0; 1]. Criteria aggregation was performed using both an additive scheme and a weighted geometric mean; the latter is recommended as the primary approach because it better reflects the non-compensatory nature of the indicators. A covariance-matrix-based correction is proposed to account for the strong correlation between criteria. The computational approbation confirmed that structural and material modifications improve the performance of traditional wall systems, while the prefabricated frame-panel system demonstrated the highest integrated performance index.

Keywords: *wall systems, thermal performance, durability, structural and material modification, normalized criteria, post-war housing recovery, optimization*.

Актуальність дослідження. Післявоєнне відновлення житла в Україні вимагає технічно обґрунтованого вибору стінових систем, здатних забезпечити достатній теплозахист, стійкість до зволоження, довговічність і прийнятну технологічність. За оновленою оцінкою Світового банку (лютий 2025 р.), загальна вартість відновлення становить 524 млрд. дол. США; житловий сектор – найбільш уражений: пошкоджено або зруйновано 13 % фонду, що торкнулося понад 2,5 млн. домогосподарств [1]. За таких умов вибір конструктивного рішення оболонки не може ґрунтуватися лише на звичності матеріалу чи первісній вартості: помилка призводить до підвищених експлуатаційних витрат і прискореної деградації.

Постановка проблеми. Базовим параметром теплофізичної ефективності огороджувальної конструкції є термічний опір, що розраховується за ISO 6946:2017 [2]. Однак для реальної експлуатації цього показника недостатньо: теплозахист пористих матеріалів суттєво залежить від вологісного режиму та довготривалої стабільності структури. Зокрема, теплопровідність автоклавного газобетону зростає зі збільшенням вологості [3], що унеможливлює коректне оцінювання таких систем виключно за «сухими» характеристиками. Саме тому в модель введено авторський показник чутливості до зволоження, що відображає реальну експлуатаційну поведінку матеріалу.

Паралельно важливу роль відіграють конструктивно-матеріальні модифікації зовнішньої оболонки. Зовнішні теплоізоляційні композиційні системи (ETICS), регламентовані EAD 040759-00-0404 [4], розглядаються в роботі не як «додатковий шар заради товщини», а як рішення, що одночасно підвищує термічний опір, зовнішній захист та довготривалу стабільність конструкції. Дреновано-вентильовані фасади, за матеріалами BC Housing [5], забезпечують відведення вологи та висихання оболонки, знижуючи ризик деградації. Нарешті, індустріалізовані й префабриковані рішення (огляд BUILD UP [6]) вирізняються високим ступенем заводської готовності, скороченням

робіт на майданчику та кращим контролем якості – що є критичним в умовах масового відновлення.

Таким чином, проблема дослідження полягає у переході від загального опису «перспективних матеріалів» до формалізованої моделі, яка кількісно оцінює вплив конструктивно-матеріальних модифікацій на теплотехнічну ефективність, вологостійкість, довговічність і стійкість оболонки. Метою роботи є розробка двоступеневої моделі оптимізації стінових систем із нормованими критеріями, альтернативними методами згортки та коригуванням на корельованість показників.

Мета роботи. Розробка двоступеневої моделі оптимізації стінових систем для відновлення житла в Україні.

Методи розрахунку. Об'єктом дослідження є дві поширені в Україні мінеральні стінові системи – автоклавний газобетон та керамічний блок – і одна індустріалізована система-орієнтир – префабрикована каркасно-панельна система [3, 6]. Для кожної мінеральної основи змодельовано два рівні конструктивно-матеріальних модифікацій, що утворюють сім варіантів порівняння: G0–G2, C0–C2 та P0 (табл. 1):

- варіант G0 є одношаровою газобетонною стіною без зовнішнього теплозахисного контуру;
- варіант G1 отримує зовнішню теплоізоляційну композиційну систему ETICS, яка підвищує термічний опір і покращує зовнішній захист [4];
- варіант G2 розвиває цю модифікацію далі – за рахунок покращених вузлів примикання та безперервного теплоізоляційного контуру зменшуються містки холоду і підвищується стійкість оболонки до деградації.

Аналогічна логіка застосована до керамічного блоку:

- варіант C0 – базова одношарова система,
- варіант C1 – з ETICS,
- варіант C2 – з утепленням і вентильованим або підсилено захисним фасадним шаром, що покращує вологостійкість і довговічність [5].
- Варіант P0 – префабрикована каркасно-панельна система заводської готовності – введено як інноваційний контрольний орієнтир для порівняння з модифікованими мінеральними варіантами [6].

Таблиця 1

Техніко-конструктивна характеристика досліджуваних стінових систем

Варіант	Несуча основа	Зовнішній теплозахисний контур	Конструктивна схема	Основний ефект модифікації
G0	Автоклавний газобетон	Відсутній	Одношарова мінеральна стіна	Базовий варіант
G1	Автоклавний газобетон	ETICS	Мінеральна основа + ETICS	Підвищення теплозахисту та зовнішнього захисту
G2	Автоклавний газобетон	ETICS + покращені вузли	Багатошарова система з безперервним теплоізоляційним контуром	Зменшення містків холоду, підвищення стійкості оболонки
C0	Керамічний блок	Відсутній	Одношарова мінеральна стіна	Базовий варіант
C1	Керамічний блок	ETICS	Мінеральна основа + ETICS	Підвищення термічного опору та стабілізація зовнішньої поверхні
C2	Керамічний блок	Утеплення + вентильований / захисний фасад	Багатошарова система з дреновано-вентильованим зовнішнім шаром	Покращення вологостійкості та довговічності оболонки
P0	Каркасно-панельна система	Інтегрований у панель	Багатошарова префабрикована система заводської готовності	Висока точність, швидкість монтажу, керованість якості

Базовим кількісним показником теплофізичної ефективності є термічний опір багатошарової конструкції. Відповідно до ISO 6946:2017, він визначається з урахуванням поверхневих опорів тепловіддачі за формулою (1):

$$R = R_{si} + \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{se}, \qquad (1)$$

де δ_i – товщина i-го шару, м; λ_i – коефіцієнт теплопровідності i-го шару, Вт/(м²·К); R_{si} = 0.13 та R_{se} = 0.04 м²·К/Вт – поверхневі опори тепловіддачі для зовнішніх стін. Включення R_{si} та R_{se} є обов'язковим для коректного визначення загального термічного опору і коефіцієнта теплопередачі $U = 1 / R$.

Оскільки для пористих матеріалів «сухих» значень теплопровідності недостатньо, паралельно введено показник чутливості до зволоження за формулою (2):

$$K_w = \frac{\lambda_w}{\lambda_{dry}} \tag{2}$$

де λ_w – теплопровідність при експлуатаційній вологості; λ_{dry} – у сухому стані. Значення $K_w > 1$ вказує на погіршення теплозахисту при зволоженні; чим ближче до одиниці, тим стабільніша система [3].

Для забезпечення порівнянності різнорідних показників усі критерії нормуються у відносній шкалі [0; 1] за мін-макс принципом. Для критеріїв, зростання яких відповідає покращенню за формулою (3):

$$\tilde{r}_{ji} = \frac{r_{ji} - r_{i,\min}}{r_{i,\max} - r_{i,\min}} \tag{3}$$

Для критеріїв-витрат, зменшення яких відповідає покращенню (вартість реалізації) за формулою (4):

$$\tilde{r}_{ij} = \frac{r_{i,\max} - r_{ij}}{r_{i,\max} - r_{i,\min}} \tag{4}$$

де r_{ij} – вихідна оцінка j-го варіанта за i-м критерієм; $r_{i,\min}$ та $r_{i,\max}$ – мінімальне та максимальне значення i-го критерію серед усіх варіантів. Такий підхід усуває залежність результату від абсолютних значень і одиниць вимірювання.

На цій основі побудовано двоступеневу модель оцінювання, де на першому етапі формується фізично-експлуатаційний показник, на другому – технологічний. Модель охоплює вісім нормованих критеріїв, розподілених між двома блоками (табл. 2).

Таблиця 2

Критерії двоступеневої оцінки

Блок	Критерій	Позначення	Вага w_i
Фізично-експлуатаційний	Теплотехнічна ефективність (R)	K_1	0,30
Фізично-експлуатаційний	Чутливість до зволоження (W)	K_2	0,20
Фізично-експлуатаційний	Довговічність (D)	K_3	0,30
Фізично-експлуатаційний	Стійкість до деградації (S)	K_4	0,20
Технологічний	Швидкість монтажу (V)	K_5	0,30
Технологічний	Ступінь заводської готовності (G)	K_6	0,25
Технологічний	Логістична доступність (L)	K_7	0,25
Технологічний	Вартість реалізації * (C)	K_8	0,20

* Критерій K_8 – витратний; нормується за формулою (4).

Ваги визначено експертно-аналітично: у фізично-експлуатаційному блоці пріоритет надано теплозахисту та довговічності (по 0,30) як основним

характеристикам придатності оболонки; чутливість до зволоження (0,20) і стійкість до деградації (0,20) відображають довготривалу стабільність системи. У технологічному блоці домінує швидкість монтажу (0,30) як ключова умова масового відновлення; заводська готовність і логістика (по 0,25) визначають реалізованість рішення, а вартість (0,20) слугує допоміжним показником.

Перший рівень моделі формує інтегральний фізично-експлуатаційний показник за адитивною схемою за формулою (5):

$$P_j = w_1\tilde{R}_j + w_2\tilde{W}_j + w_3\tilde{D}_j + w_4\tilde{S}_j\,. \tag{5}$$

Другий рівень дає інтегральний технологічний показник за формулою (6):

$$T_j = w_5\tilde{V}_j + w_6\tilde{G}_j + w_7\tilde{L}_j + w_8\tilde{C}_j\,, \tag{6}$$

де тильда позначає нормоване значення відповідного критерію. Підсумковий показник системи за формулою (7):

$$I_j = 0,65\cdot P_j + 0,35\cdot T_j \tag{7}$$

Співвідношення 0,65/0,35 відображає пріоритет фізично-експлуатаційних властивостей над технологічними при кінцевому виборі системи. Для оцінки ефекту модифікації додатково розраховується приріст інтегрального показника за формулою (8):

$$\Delta_j = I_{j(\mathrm{mod})} - I_{j(base)} \tag{8}$$

Адитивна схема допускає повну компенсацію: низький рівень одного критерію може бути «перекритий» високими значеннями інших. Для стінових систем, де одночасне задоволення вимог із теплозахисту і довговічності є обов'язковим, така компенсація методично небажана. Тому поряд з адитивною згорткою в роботі застосовано метод зваженого середнього геометричного, який чутливий до слабких місць рішення і не дозволяє їх маскувати. Геометричний аналог фізично-експлуатаційного показника за формулою (9):

$$P_j^g = \tilde{R}_j^{w_1}\cdot\tilde{W}_j^{w_2}\cdot\tilde{D}_j^{w_3}\cdot\tilde{S}_j^{w_4} \tag{9}$$

Аналогічно для технологічного блоку згідно формули (10):

$$T_j^g = \tilde{V}_j^{w_5}\cdot\tilde{G}_j^{w_6}\cdot\tilde{L}_j^{w_7}\cdot\tilde{C}_j^{w_8} \tag{10}$$

Підсумковий геометричний показник згідно формули (11):

$$I_j^g = \left(P_j^g\right)^{0,65}\cdot\left(T_j^g\right)^{0,35} \tag{11}$$

Геометрична згортка рекомендується як основна; адитивна застосовується для перевірки стійкості рейтингу.

Окремою методичною проблемою є сильна кореляція критеріїв K_1, K_3 і K_4: конструктивні рішення, що покращують теплозахист (ETICS, безперервний контур), одночасно підвищують довговічність і стійкість до деградації. Ігнорування цього зв'язку призводить до систематичного завищення оцінки модифікованих варіантів, оскільки три критерії з високою кореляцією фактично несуть схожу інформацію, але потрапляють у суму тричі. Для усунення цього ефекту застосовано декорелюючий підхід на основі матриці коваріацій. Нехай $\mathbf{w} = (w_1,\ldots,w_4)$ – вектор ваг фізично-експлуатаційного блоку, $\mathbf{\Sigma}$ – матриця коваріацій нормованих оцінок варіантів за його критеріями. Скоригований вектор ваг визначається за формулою (12) як:

$$\mathbf{w}^* = \frac{\mathbf{\Sigma}^{-1}\mathbf{w}}{\mathbf{1}\times\mathbf{\Sigma}^{-1}\mathbf{w}} \tag{12}$$

де $\mathbf{1}$ – вектор-стовпець з одиниць. Ця формула перерозподіляє ваги так, щоб зменшити внесок критеріїв, що несуть «одну й ту саму» інформацію, і підсилити внесок тих, що є відносно незалежними. Після перерахунку $\mathbf{w^*}$ підставляється замість w_i у відповідні формули адитивної та геометричної згорток. Якщо матриця $\mathbf{\Sigma}$ оцінюється на малій вибірці варіантів, застосовується регуляризована версія $\mathbf{\Sigma}_{\text{reg}} = (1 - \alpha)\mathbf{\Sigma} + \alpha\mathbf{I}$, де $\mathbf{I}$ – одинична матриця, а $\alpha = 0.1$ – рекомендований параметр регуляризації, що запобігає виродженню оберненої матриці.

Отримані результати. Для перевірки працездатності моделі виконано розрахункову апробацію для всіх семи варіантів. Вихідні оцінки встановлено за п'ятибальною шкалою на основі будівельно-фізичних і технологічних характеристик кожної системи, після чого нормовано за наведеними вище формулами (табл. 3):

- вищі значення $\tilde{R}_j$ отримали варіанти із зовнішнім теплоізоляційним контуром, оскільки ETICS і багатошарові панельні рішення підвищують термічний опір оболонки;
- нижчі значення $\tilde{W}_j$ – системи, чутливіші до зволоження, тоді як вентильовані та багатошарові варіанти оцінено вище завдяки кращому вологісному режиму;
- G0 отримав найнижчий бал за $\tilde{W}_j$ через підвищену чутливість автоклавного газобетону до вологи;

- P0 – найвищі значення $\widetilde{V}_j$ та $\widetilde{G}_j$ як індустріалізоване рішення з найвищим ступенем заводської готовності.

Таблиця 3

Нормовані оцінки варіантів $\widetilde{r}_{ij}$

Варіант	$\tilde{R}_j$	$\tilde{W}_j$	$\tilde{D}_j$	$\tilde{S}_j$	$\tilde{V}_j$	$\tilde{G}_j$	$\tilde{L}_j$	$\tilde{C}_{j*}$
G0	0,33	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	1,00	0,50
G1	0,67	0,33	0,50	0,50	0,33	0,00	0,67	0,25
G2	1,00	0,67	0,50	1,00	0,00	0,00	0,33	0,00
C0	0,00	0,67	1,00	0,50	0,00	0,00	0,67	0,25
C1	0,67	0,67	1,00	1,00	0,00	0,00	0,33	0,25
C2	0,67	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P0	1,00	0,67	0,50	0,50	1,00	1,00	0,00	0,00

Для ілюстрації наведемо розрахунок для базового варіанта G0 за адитивною схемою. Підстановка нормованих значень дає:

$$P(\text{G0}) = 0{,}30\cdot0{,}33 + 0{,}20\cdot0{,}00 + 0{,}20\cdot0{,}00 = 0{,}099$$

$$T(\text{G0}) = 0{,}30\cdot0{,}33 + 0{,}25\cdot0{,}00 + 0{,}25\cdot1{,}00 + 0{,}20\cdot0{,}50 = 0{,}449$$

$$I(\text{G0}) = 0{,}65\cdot0{,}099 + 0{,}35\cdot0{,}449 = 0{,}221$$

Аналогічно розраховано показники для всіх варіантів. При розрахунку за геометричною схемою варіанти з нульовими нормованими значеннями окремих критеріїв отримали поправку $\varepsilon = 0{,}01$ для уникнення вироджень. Підсумкові результати зведено в табл. 4.

Таблиця 4

Підсумкові результати розрахунку

Варіант	P_j (ад.)	T_j (ад.)	I_j (ад.)	ΔI_j	P_j^g (геом.)	T_j^g (геом.)	I_j^g (геом.)	Ранг (геом.)
G0	0,099	0,449	0,221	–	0,000	0,000	0,000	7
G1	0,367	0,350	0,361	+0,140	0,207	0,122	0,176	5
G2	0,500	0,100	0,360	+0,139	0,237	0,000	0,000	6
C0	0,430	0,348	0,402	–	0,000	0,000	0,000	7
C1	0,601	0,223	0,469	+0,067	0,371	0,000	0,000	4
C2	0,610	0,000	0,397	−0,005	0,403	0,000	0,000	3
P0	0,535	0,550	0,541	–	0,382	0,323	0,358	1

Отримані результати демонструють принципову відмінність двох методів згортки, яка є не технічним артефактом, а змістовним висновком. За адитивною

схемою P0 посідає перше місце (I = 0,541), далі йдуть C1 (0,469), C0 (0,402), C2 (0,397), G2 і G1 (≈ 0,360), G0 (0,221).

Всі модифіковані варіанти перевершують відповідні базові, що підтверджує ефективність конструктивно-матеріальних модифікацій. Водночас геометрична згортка фіксує нульові значення I^g для більшості мінеральних систем через $\widetilde{G}_j = 0$ (низький ступінь заводської готовності), що обнуляє технологічний блок. Це не вирок системам, а діагностичний сигнал: геометрична модель вказує на конкретну «слабку ланку», усунення якої – наприклад, через організацію заводського виготовлення вузлових елементів – могло б суттєво підвищити підсумковий показник. P0 є єдиним варіантом з ненульовим I^g = 0,358, що свідчить про відсутність критично слабких позицій серед усіх восьми критеріїв одночасно.

Після застосування коригування на корельованість за формулою скоригованих ваг ваги K_1, K_3 та K_4 у фізично-експлуатаційному блоці знижуються – внесок корельованих критеріїв нормується, і перевага модифікованих варіантів над базовими дещо скорочується. Це вказує на те, що частина «приросту» в адитивній моделі обумовлена не реальним багатовимірним покращенням, а статистичним зв'язком між показниками. Таким чином, коригування на мультиколінеарність є не технічним уточненням, а змістовною складовою методу, що підвищує об'єктивність порівняння.

Узагальнюючи результати апробації, можна сформулювати такі висновки: конструктивно-матеріальні модифікації стабільно підвищують інтегральну ефективність мінеральних стінових систем за обома методами згортки;

- для газобетону за адитивною розрахунковою схемою найефективнішою є G2, однак нульова позиція за технологічними критеріями знижує її геометричний показник, тоді як G1 виявляється більш збалансованим рішенням;
- для керамічного блоку найкращий адитивний результат дає C1, тоді як геометрично дещо кращим за фізичним блоком є C2 при однаково слабкій технологічній позиції;
- P0 залишається беззаперечним лідером, оскільки поєднує прийнятний рівень фізично-експлуатаційних властивостей з найкращими технологічними характеристиками.

Висновки.

1. У роботі розроблено двоступеневу модель оптимізації стінових систем для відновлення житла в Україні. Формула термічного опору доповнена поверхневими опорами R_{si} та R_{se} відповідно до ISO 6946:2017, що забезпечує

коректне визначення R та U. Запроваджено нормування критеріїв у шкалі [0; 1] за мін-макс принципом, що усуває залежність від розмірності і забезпечує порівнянність різнорідних показників. Поряд з адитивною згорткою введено метод зваженого середнього геометричного, рекомендований як основний: він штрафує рішення зі слабкими позиціями за окремими критеріями і тим самим виявляє системні вразливості, які адитивна модель здатна приховувати. Для усунення систематичного завищення оцінки через сильну корельованість K_1, K_3 та K_4 запропоновано коригування ваг на основі оберненої матриці коваріацій з регуляризацією.

2. Розрахункова апробація підтвердила, що конструктивно-матеріальні модифікації підвищують ефективність традиційних стінових систем. Для газобетону найбільш збалансованим є варіант G1, для подальшого підвищення фізичних показників – G2 за умови організаційного вирішення технологічних обмежень. Для керамічного блоку оптимальним за сукупністю критеріїв є варіант C1. Інноваційний контрольний варіант P0 має найвищий інтегральний показник завдяки відсутності критично слабких позицій серед усіх восьми критеріїв одночасно.
3. Методична цінність роботи полягає у формалізації нормованої багатокритеріальної процедури вибору із двома методами згортки та корекцією на мультиколінеарність. Практичне значення – можливість технічно обґрунтованого вибору та оптимізації стінових систем при відновленні житла в різних регіонах України.

Література | References

1. World Bank. Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released. 2025 Feb 25.
2. ISO. ISO 6946:2017 Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods. Geneva: ISO; 2017.
3. Mathey RG, Rossiter WJ. A review of autoclaved aerated concrete products. Gaithersburg: NIST; 1988. NBS IR 87-3670.
4. European Organization for Technical Assessment. EAD 040759-00-0404 External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) with rendering on boards based on polystyrene and cement. Brussels: EOTA; 2021.
5. BC Housing. Performance of Rainscreen Wall Assemblies in Vancouver, British Columbia.
6. BUILD UP. Modular and industrialized solutions for building renovation. 2021.

УДК 536.24.021

ANALYSIS OF LAMB WAVE SCATTERING IN MULTILAYERED COMPOSITE STRUCTURES

Abuladze A.[1,a], **Pysarenko A.**[1,b,*]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

[a] *1st-year student;* [b] *PhD, Assoc. Prof. at the Dept. of Physics*

[*] *Corresponding author: pysarenkoan@gmail.com*

Abstract. *This study examines Lamb wave scattering in layered composite structures using wavelet transform techniques to analyze dynamic behavior. The approach focuses on decomposing the energy spectrum of scattered signals to extract detailed dispersion characteristics. By applying continuous wavelet transforms, the methodology enables precise time-frequency localization and the reconstruction of phase velocity dispersion curves in narrow frequency bands. A key feature is the selective reconstruction of these curves based on wavefield frequency content, which improves signal interpretability. The research shows that narrowband reconstruction is essential for capturing guided wave mode evolution near structural discontinuities. To enhance sensitivity to subtle spectral features, a filtering procedure is introduced to suppress dominant high-amplitude components that mask diagnostic data. This step increases contrast in the time-frequency domain, allowing for effective detection of phase shifts and mode conversions caused by internal anomalies. The developed framework provides new insights into wave interaction with inhomogeneities and advances defect characterization for non-destructive evaluation and structural health monitoring*.

Keywords: *scattering analysis, Lamb waves, laminar composites, wavelet transform, dispersion curves, structural health monitoring.*

Introduction. The scattering of Lamb waves within laminar composite media constitutes a critical area of investigation in elasto-dynamics and structural health monitoring. These guided modes, propagating in thin-walled structures, are governed by transcendental dispersion relations, yielding symmetric (S) and antisymmetric (A) modes defined by frequency-thickness products and the constitutive anisotropy of the material. In multi-layered laminates, characterized by discrete orthotropic plies and interlamination bonding, wave phenomena exhibit heightened complexity relative to isotropic elastic media. Quantitative analysis of scattering mechanisms is imperative for characterizing the interaction between incident energy and sub-surface discontinuities, such as delaminations, interlaminar voids, and transverse cracks. Such interactions necessitate a redistribution of spectral energy across modal orders and spatial directions, manifesting as localized perturbations in complex amplitude and phase.

Kinematic differences between incident symmetric and antisymmetric modes dictate the resulting scattering field. Symmetric modes, dominated by in-plane

displacement components, exhibit elevated phase velocities and lower sensitivity to surface-bounded perturbations. Conversely, antisymmetric modes, characterized primarily by flexural out-of-plane displacements, demonstrate high sensitivity to geometric asymmetries and delamination-type defects. Effective analysis requires the decomposition of scattering fields with respect to modal participation and laminate-level anisotropy, particularly where coupling between longitudinal and flexural dynamics is non-negligible. Central to this analysis is the rigorous differentiation between phase velocity, defining wavefront propagation, and group velocity, representing the rate of energy transport. In dispersive, anisotropic media, the non-identity of these velocities necessitates specialized signal processing for the temporal and spatial isolation of scattering events.

Memmolo et al. [1] implemented wave field decomposition to isolate modal and scattered signals within stiffened composite architectures. Under this framework, the total wavefield is treated as a linear superposition of incident and scattered components, facilitating the quantification of energy redistribution and the formulation of inverse problems for defect geometry reconstruction. For signal interpretation, the zero-crossing algorithm serves as a robust tool for estimating phase shifts in stochastic or high-noise environments. By tracking the discrete temporal instances of signal nullification, this technique provides precise estimates of time-of-flight and phase delay, independent of amplitude-based attenuation. This ensures superior spatial resolution when localizing structural anomalies compared to conventional energy-thresholding methods.

Advanced computational frameworks, specifically semi-analytical finite element and spectral element methods, enable the high-fidelity modeling of scattering by incorporating precise layered geometries and anisotropic elasticity tensors. These validated numerical models allow for the high-resolution mapping of scattering cross-sections and inter-modal energy transfer. Experimental validation is typically achieved through full-field measurement techniques; for instance, Kudela et al. [2] employed scanning laser Doppler vibrometry to characterize high-resolution scattered fields for delamination detection in composites. Such empirical data facilitate model calibration and the visualization of complex diffraction patterns. Furthermore, time-frequency analysis using the continuous wavelet transform is critical for resolving overlapping modal arrivals within broadband excitation signals.

In engineering practice, scattering analysis is indispensable for the detection of structural degradation in wind turbine blades and aerospace components. The selective sensitivity of specific modes to particular defect classes enables the optimization of inspection protocols, where excitation frequencies and sensor topologies are tailored

for maximum probability of detection. While symmetric modes are frequently utilized for the identification of through-thickness cracks, antisymmetric modes are preferentially applied for surface-breaking defects and interlaminar damage.

Materials and Methods. The experimental methodology focuses on the acquisition and processing of guided elastic waves to evaluate scattering phenomena in laminated composite plates. In the established configuration, the wave source is positioned at fixed time t coordinates x and is driven by a broadband excitation pulse $s(t)$, which generates a spectrum of Lamb wave modes. To capture the dynamic response of the material, at least two receiving sensors are placed at relatively close spatial intervals, denoted as x_i and x_{i+1}. These signals provide the necessary data to determine the frequency dependent phase velocity $c_p(f)$ and analyze the evolution of the wavefield as it interacts with the internal structure of the laminate. The captured signal $u_i(t)$ at a specific distance x_i from the source is influenced by the propagation characteristics of the medium and can be represented in the frequency domain. Applying the inverse Fourier transform, the time domain T signal is defined by expression

$$u_i(t) = FT^{-1}[S(f) \cdot H(f)]. \quad (1)$$

where $S(f)$ represents the Fourier transform of the initial incident pulse; F is the frequency domain. The propagation of the wave through the layered medium is governed by a transfer function $H(f)$, which accounts for the dispersion and attenuation effects within the composite.

This transfer function takes the form

$$H(f) = \exp\left[- j \frac{2\pi f x_i}{c_p(f)} \right], \quad (2)$$

where $j = \sqrt{-1}$.

To extract the phase information essential for the zero-crossing analysis, the spectral phase of the transfer function is calculated as follows

$$\phi(f) = \arctan \frac{\mathrm{Re}(H(f))}{\mathrm{Im}(H(f))} . \quad (3)$$

This phase shift is directly related to the travel time and the distance between the observation points. The zero-crossing technique operates by identifying the precise moments when the signal amplitude crosses the horizontal axis, providing a reliable measure of phase evolution without being heavily affected by signal distortion. The

relationship between the measured phase difference and the phase velocity for a given frequency component is defined by the following expression

$$c_p(f) = \frac{2\pi f (x_{i+1} - x_i)}{\Delta\phi(f)}, \tag{4}$$

where the denominator represents the change in phase between the two receiver locations. In the presence of scattering due to material inhomogeneities or defects, the phase velocity curves exhibit localized perturbations. To enhance the resolution of these features, a wavelet-based decomposition is integrated into the processing framework. The continuous wavelet transform allows for simultaneous time and frequency localization of the wave components, which is achieved through the following integral

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \cdot a^{-0.5} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \tag{5}$$

where W are the wavelet coefficients; a is the scale parameter; b is the translation parameter; ψ^* – is the complex conjugate of the mother parameter.

This decomposition separates the overlapping wave modes and facilitates the selective reconstruction of dispersion curves. By suppressing dominant high amplitude components through spectral filtering, the visibility of scattered signals is significantly improved, allowing for the detection of subtle mode conversions and phase shifts that are indicative of internal structural changes.

Results and Discussion. The zero-crossing method is based on the delay times t_{im} and $t_{(i+1)m}$ of the propagating waves. The delay times are calculated from the characteristics of the signals recorded at different positions x_i and x_{i+1}. These signals are analyzed according to the zero-crossing algorithm for relative amplitude A' for $t \in (0 – 60)$ μs (see Fig. 1).

The number of measured zero crossing moments is $m = 1, 2, \ldots, M$, where M is the total number of analyzed moments. In the second stage of the zero-crossing technique, the phase velocity c_{pm} of the propagating wave at a given distance can be estimated using the following formula

$$c_{pm} = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_{im}} = \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{(i+1)m} - t_{im}}. \tag{6}$$

where Δx_i is the distance between two neighboring positions; Δt_{im} is the signals delay time difference.

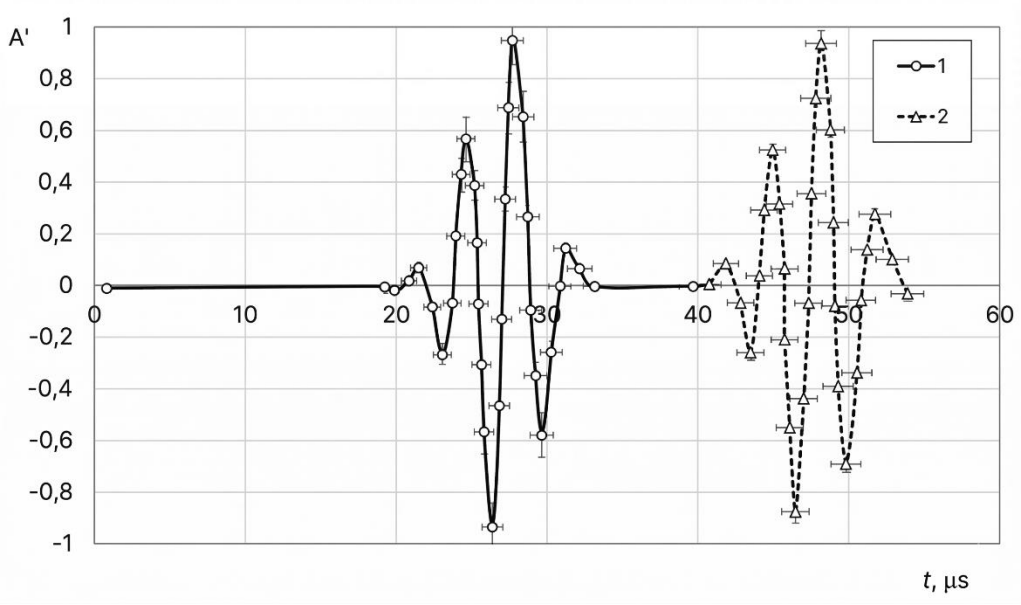


Fig. 1. Wave form of received signals: 1 – $u_i(t)$, 2 – $u_{i+1}(t)$

The time delay Δt_{im} can be calculated based on the data on the delay times of the zero-crossing t_{im} and $t_{(i+1)m}$. The frequencies f_m, to which the calculated phase velocities c_{pm} correspond, are calculated for the duration of half the period between two adjacent zero-crossing points m and $m + 1$

$$f_m = \frac{1}{2[t_{i(m+1)} - t_{im}]}. \tag{7}$$

Each segment of the dispersion curve is uniquely defined by a set of phase velocity and frequency pairs $D(f_m,c_{pm})$. Analysis of the calculated propagation characteristics of Lamb wave packets showed that the proposed measurement method has one main limitation. The phase velocity dispersion curves are reconstructed only in a relatively limited bandwidth around the central frequency of the signal. Consequently, information on a part of the frequency spectra of the signal was lost. To solve this limitation and reconstruct the phase velocity dispersion curves of guided waves in the widest possible frequency ranges, it was proposed to use the spectral decomposition method.

According to Fourier theory, any signal $s(t)$ can be expanded into trigonometric functions as follows

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\exp(-j\omega t)dt = S(\omega)\exp[-j\varphi(\omega)]. \tag{8}$$

where ω is the angular frequency; $S(\omega)$ is the amplitude-frequency response; $\varphi(\omega)$ is the phase-frequency response.

It can be stated that the frequency response of the signal corresponding to the Lamb wave packets is the result of such a decomposition. The modulus of the complex spectrum represents the amplitudes of the various frequency components. The signal spectrum corresponds to the interval in which the dominant frequency components are concentrated in the frequency band around the maximum of the spectrum. These features are the reason that without filtering the phase velocity dispersion curve will be reconstructed in a narrow frequency band around the central frequency. Therefore, a necessary condition for increasing the sensitivity of the signal processing method to frequency components with small amplitudes is the procedure of filtering the frequency components that correspond to higher amplitudes (see Fig. 2).

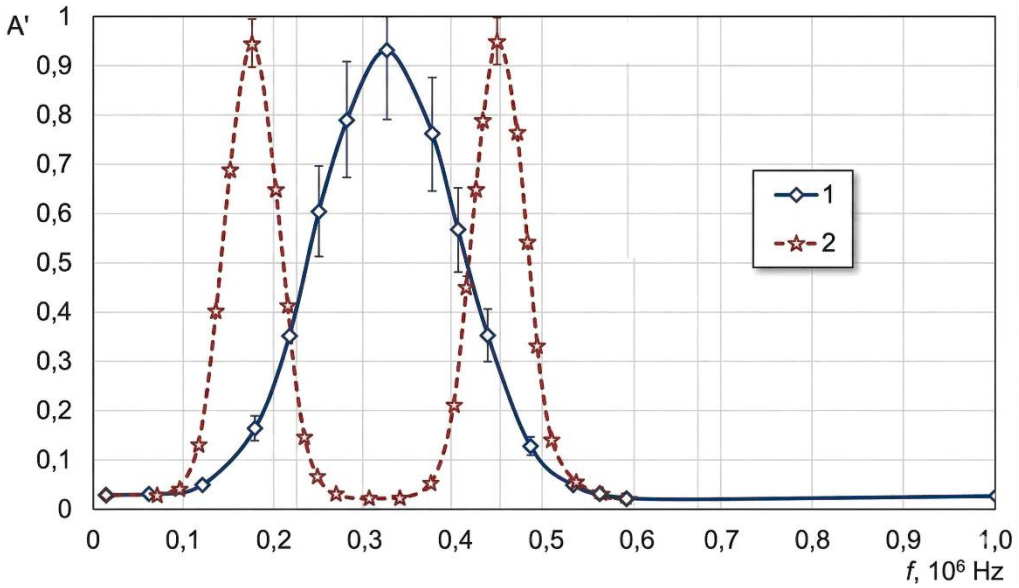


Fig. 2. Frequency spectrum of Lamb wave signal: 1 – signal; 2 – filter

The zero-crossing algorithm assumes the possibility of decomposing the measured signals $u_i(t)$ at different distances into a set of signals with a limited bandwidth $u_{ik}(t)$. Such a procedure becomes possible provided that the signals $u_i(t)$ are filtered using bandpass filters with a narrower bandwidth than the bandwidth of the incident spectrum.

At the next step for each filtered signal $u_{ik}(t)$ the delay times $t_{i,mk}$ and $t_{(i+1),mk}$ are estimated. In this way, the phase velocities $c_{p,mk}$ and frequencies f_{mk} are calculated. Then, the obtained sets (f_{mk}, $c_{p,mk}$) can be represented as segments of the phase velocity dispersion curve.

For verification, the proposed method was implemented across the frequency range of 0.1×10^6 Hz to 1×10^6 Hz, matching the experimental parameters reported by Testoni et al. [3]. Scanning the filter central frequency within this interval enables the effective segmentation of the spectral curve. This approach reconstructs segments

$D(f_m,c_{pm})$ across the entire incident spectrum. Although the method is narrow-band for each individual filter, scanning across wide ranges allows for the reconstruction of dispersion curves in the widest possible intervals, ensuring a thorough evaluation of guided wave characteristics.

Conclusion. The analysis of Lamb wave propagation shows that the zero-crossing technique is a valid method for determining phase velocity $c_p(f)$ from signals captured at distinct locations x_{i+1} and x_{i+1}. The wave propagation is described by a transfer function where the Fourier transform $S(f)$ of the incident packet $s(t)$ is essential. In practice, delay times t_{im} and $t_{(i+1)m}$ are calculated from signals $u_i(t)$ and $u_{i+1}(t)$ for moments $m = 1,2,\ldots,M$. Phase velocity c_{pm} is estimated using the distance between sensors and the delay difference Δt_{im}. Frequencies f_m are identified based on the duration of the half-period between points m and $m + 1$.

To overcome the narrow-band limitations of the zero-crossing method, spectral decomposition expands signal $s(t)$ into trigonometric functions with frequency ω and phase $\phi(\omega)$ enhancing the detection of small-amplitude components. By decomposing $u_i(t)$ into filtered components $u_{ik}(t)$, parameters such as $t_{i,mk}$, $c_{p,mk}$ and f_{mk} are calculated. This scanning approach reconstructs segments $D(f_m,c_{pm})$ across the entire incident spectrum, ensuring a thorough characterization of guided waves.

References

1. Memmolo, V., Monaco, E., Boffa, N. D., Maio, L., & Ricci, F. (2018). Guided wave propagation and scattering for structural health monitoring of stiffened composites. *Composite Structures*, 184, 568-580.
   DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.067
2. Kudela, P., Wandowski, T., Malinowski, P., & Ostachowicz, W. (2017). Application of scanning laser Doppler vibrometry for delamination detection in composite structures. *Optics and Lasers in Engineering*, 99, 46-57.
   DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.022
3. Testoni, N., De Marchi, L., & Marzani, A. (2016). Detection and characterization of delaminations in composite plates via air-coupled probes and warped-domain filtering. *Composite Structures*, 153, 773-781.
   DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.07.005

УДК 515.14+551.58

DESIGN OF A COMPLEX SUN-PATH DIAGRAM FOR THE CITY OF LVIV

Navrotsky N.[1,a], **Zaginaylo I.**[1,b,*]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

[a] *3rd-year student;* [b] *PhD, Assoc. Prof. at the Dept. of Physics*

[*] Corresponding author: *i.v.zaginaylo@odaba.edu.ua*

Abstract. *For the design of effective solar shading devices, it is convenient to use complex polar sun-path diagrams with the allocation of zones of possible overheating, where sunlight exposure is considered excessive, and zones of overcooling, where sunlight exposure is desirable and plays the role of passive heating. The purpose of this work is to improve the existing methods of calculating complex sun-path diagrams. This work proposes a design method that is completely analytical and easily automated. As an example of the application of the method, a complex sun-path diagram for the city of Lviv was developed. The resulting complex sun-path diagram can be used to design new or optimize existing solar shading devices.*

Keywords: *complex sun-path diagram; annual temperature graphs; solar coordinates; solar trajectories; solar shading devices.*

Relevance of the study. For the development of effective solar shading devices, the National Standard of Ukraine [1] recommends using complex polar sun-path diagrams with designated zones of potential overheating, where sunlight exposure is considered excessive, and zones of potential overcooling, where it is desirable and serves as passive heating. The sunlight available chart of the developed solar shading device should cover the potential overheating zone on the sun-path diagram without obstructing the zone of desirable sunlight exposure. The development of complex polar sun-path diagrams for various cities of Ukraine is a relevant task of significant practical importance.

State of the problem. A standard polar sun-path diagram for the corresponding latitude and long-term observational data of diurnal temperature variations for each day of the year is required to construct a complex polar sun-path diagram. Unfortunately, such detailed climatological data are not readily available. In the article of O V. Sergeichouk [2], an example of calculating a complex polar sun-path diagram for the city of Kyiv is presented based on limited climatological data contained in the National Standard of Ukraine [3]. Based on these data, diurnal variations of average monthly temperatures were calculated, and the surface plot of the function $t(T, D)$ was constructed, where t is air temperature, T is time of day, and D is day of the year. The

region above the 21°C isoline corresponds to the region of dates and times of potential overheating during sunlight exposure; below the 8°C isoline to the region where sunlight exposure is desirable for passive heating. The 21°C and 8°C isolines were projected onto the sun-path diagram corresponding to the latitude of Kyiv – thus, the complex polar sun-path diagram was obtained.

In work [4], the calculation of the overheating zone location on the sun-path diagram for the city of Kharkiv was performed. In addition to the climatological data [3], data from an astronomical reference were used, from which the sunrise time and equatorial coordinates of the Sun for each day of the year were obtained.

In works [5-6], we previously calculated complex polar sun-path diagrams for the cities of Dnipro, Odesa, and Chernihiv. The calculation of solar trajectories was performed using the algorithm [7], and to determine the boundaries of temperature zones on the annual graphs of average temperature, piecewise approximation with bicubic polynomials was applied.

It is known that polynomial approximation outside the range of defined points usually diverges rapidly, and within the range it may produce false extrema. Additionally, a separate procedure is required for joining adjacent segments with different polynomials. Therefore, abandoning piecewise polynomial approximation is a natural next step in the development of the method for calculating complex polar sun-path diagrams.

Objective of the work. To improve the analytical method for calculating complex polar sun-path diagrams proposed in [5-6].

Calculation method. To create the complex polar sun-path diagram for the city of Lviv, instead of using the sun-path diagram for 50° N latitude recommended in the National Standard [1], a sun-path diagram was calculated using the algorithm [7] for the actual latitude of the city, which is 49.84° N. To ensure compatibility of sun-path diagrams obtained using the algorithm [7] with the sun-path diagrams of the National Standard [1], which are constructed under more simplified assumptions, the moment was taken when the Sun crosses the celestial meridian at upper culmination as 12:00 solar time, and to measure solar time during the daylight period relative to this moment. The solar trajectory was considered to be the trajectory of the center of the solar disk.

To determine the zones of potential overheating and desirable sunlight exposure, climatological data provided in the National Standard [3] were also used, namely the average monthly temperature values t_{avg} and the average monthly amplitudes of diurnal temperatures A (presented in Table 1).

Table 1

Average monthly temperature regime parameters of the city of Lviv [3]

month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t_{avg}, °C	-4	-2,7	1,4	7,9	13,4	16,3	17,7	17,2	13	8	2,5	-2,2
A, °C	6,3	6,4	7,6	6,5	10,2	10	10,2	10,4	9,6	8,6	5,8	5,4

Based on these data, the diurnal variation of air temperature based on monthly averages were reconstructed, assuming that the obtained diurnal variations correspond to those on the 15th day of each month, except for February, for which the 14th day was taken as such a date. The reconstruction of the diurnal variations of the average monthly temperature was carried out in accordance with the guidelines of the National Standard [3] using the following formulas:

$$\begin{aligned} t &= \frac{A}{2}\sin\left(\frac{\pi}{2}\cdot\frac{2x-9-3T_{\min}}{9+T_{\min}}\right)+t_{avg} \quad for \quad 0 \le x < T_{\min} \\ t &= \frac{A}{2}\sin\left(\frac{\pi}{2}\cdot\frac{2x-15-T_{\min}}{15-T_{\min}}\right)+t_{avg} \quad for \quad T_{\min} \le x < 15 \\ t &= \frac{A}{2}\sin\left(\frac{\pi}{2}\cdot\frac{2x-21+T_{\min}}{9+T_{\min}}\right)+t_{avg} \quad for \quad 15 \le x < 24 \end{aligned}, \qquad (1)$$

where t is the current temperature value, x is the current time, and T_{min} is the time of the daily minimum temperature, which occurs 15 minutes after sunrise.

To determine T_{min}, the time of sunrise was calculated, where the moment of sunrise was considered to be the moment when the upper edge of the solar disk appears above the horizon plane. This moment in time was determined taking into account atmospheric refraction in the Earth's atmosphere in the form of a constant correction to the solar altitude (−0.83°). The calculation was performed using the same algorithm [7] that was used for calculating solar trajectories.

Results obtained. Based on the diurnal curves of the average monthly temperature for January – December in the city of Lviv calculated using formulas (1), annual variations of the average temperature for each half-hour of solar time were obtained. Fig. 1 shows some of the obtained dependences. Along the horizontal axis, the dates corresponding to the 15th day of each month (except February) are plotted, expressed in months using the formula $z = m - 1 + 15/d$, where m is the number of the month and d is the number of days in the month. For February, $z = 2 - 1 + 14/28 = 1.5$.

Since, according to the climatological data of the National Standard [3], the presented variation of the average temperature is assumed to repeat every year, these variations can be treated as a strictly periodic process that repeats every 12 months. Thus, a Fourier series expansion of these dependences can be proposed:

$$t(z) = t_0 + \sum_k \left(A_k \cos(\omega_k z) + B_k \sin(\omega_k z) \right), \qquad (2)$$

where t_0 is a constant value, and A_k and B_k are the expansion coefficients for the k-th harmonic (frequency w_k), with the fundamental frequency $w_1 = 2\pi / 12$ and $w_k = kw_1$, $k = 2,3,4,\ldots$.

Considering that throughout the year only 12 data points are available, and these points are unevenly spaced, it is not possible to use discrete algorithms such as the Fast Fourier Transform for performing the Fourier transform. Therefore, the method of Least Squares is used for the expansion. In this case, it is possible to obtain the coefficients of only the first five harmonics.

In Fig. 1, the lines also show Fourier series approximations (including harmonics up to the fifth) of the given temperature dependences $t(z)$. The square of the Pearson correlation coefficient R^2 in all cases was not less than 0.9999, indicating that five harmonics are sufficient for the expansion (2).

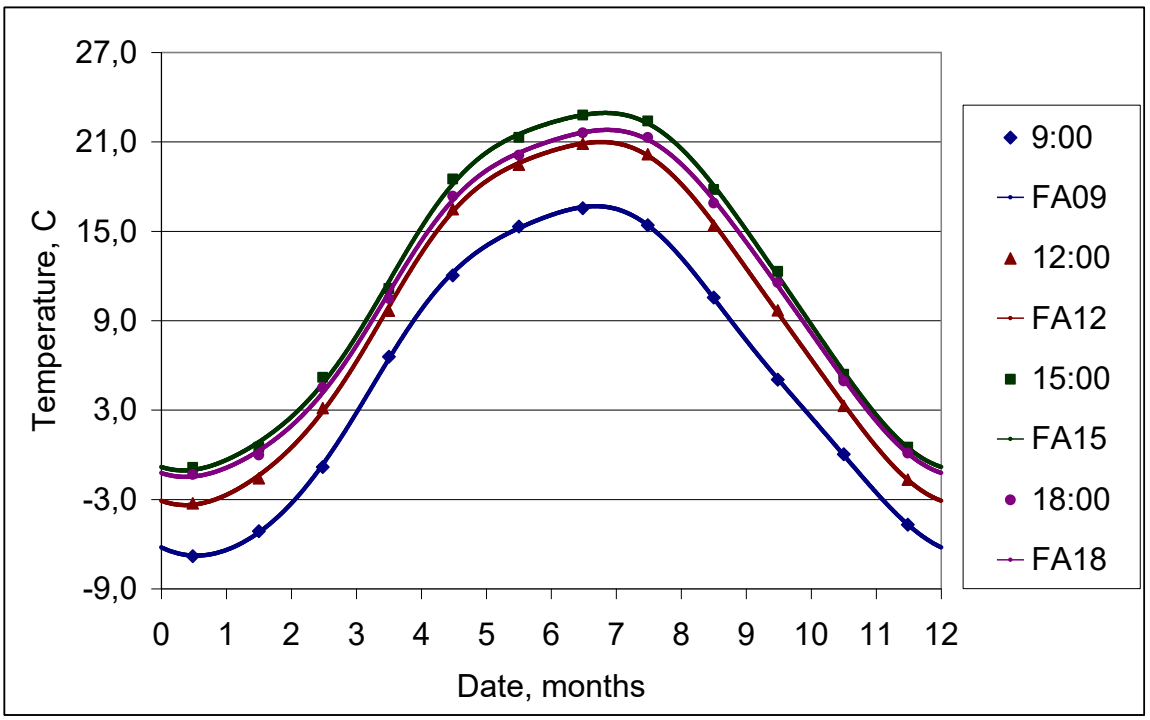


Fig. 1. Annual graphs of the average temperature in the city of Lviv at 9:00, 12:00, 15:00, and 21:00 solar time and their Fourier series approximations

The Fourier series expansion using the Least Squares method was implemented and carried out in MS Excel.

The date ranges of overheating and/or underheating at each half-hour time step were determined by numerically solving the equations $t(z) = 21$ and $t(z) = 8$ using the obtained Fourier series coefficients. The equations were solved using the Goal–Seek function in MS Excel.

Table 2 presents the calculated date ranges during which overheating occurs at specific times of the day according to solar time.

Table 2

Dates of the beginning and end of overheating at half-hour intervals for the city of Lviv

Time	11:58	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00
Date of the start	07/24	07/01	06/21	06/15	06/11	06/08	06/08	06/08	06/09	06/12	06/16
Date of the end	07/29	08/10	08/17	08/21	08/24	08/26	08/26	08/26	08/25	08/24	08/22
Time	17:30	18:00	18:30	19:10							
Date of the start	06/21	06/28	07/08	07/24							
Date of the end	08/20	08/16	08/11	07/29							

Table 3 presents the calculated date ranges during which underheating occurs at specific times of the day according to solar time.

Table 3

Dates of the beginning and end of underheating at half-hour intervals for the city of Lviv

Time	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30
Date of the start	09/15	09/15	09/17	09/19	09/21	09/24	09/28	10/02	10/06	10/10	10/14	10/18
Date of the end	05/06	05/04	05/02	04/29	04/27	04/24	04/21	04/19	04/16	04/14	04/11	04/09
Time	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	17:30
Date of the start	10/22	10/25	10/28	10/31	11/02	11/03	11/03	11/03	11/03	11/02	-	-
Date of the end	04/07	04/05	04/03	04/02	04/01	03/31	03/31	03/31	03/31	03/31	04/01	04/02

For the obtained points with coordinates [time; start date] and [time; end date], the corresponding solar coordinates in the format [azimuth A; altitude h_o] were calculated and projected onto the sun-path diagram for Lviv. The obtained points were connected by lines that defined the regions of overheating and underheating – see Fig. 2.

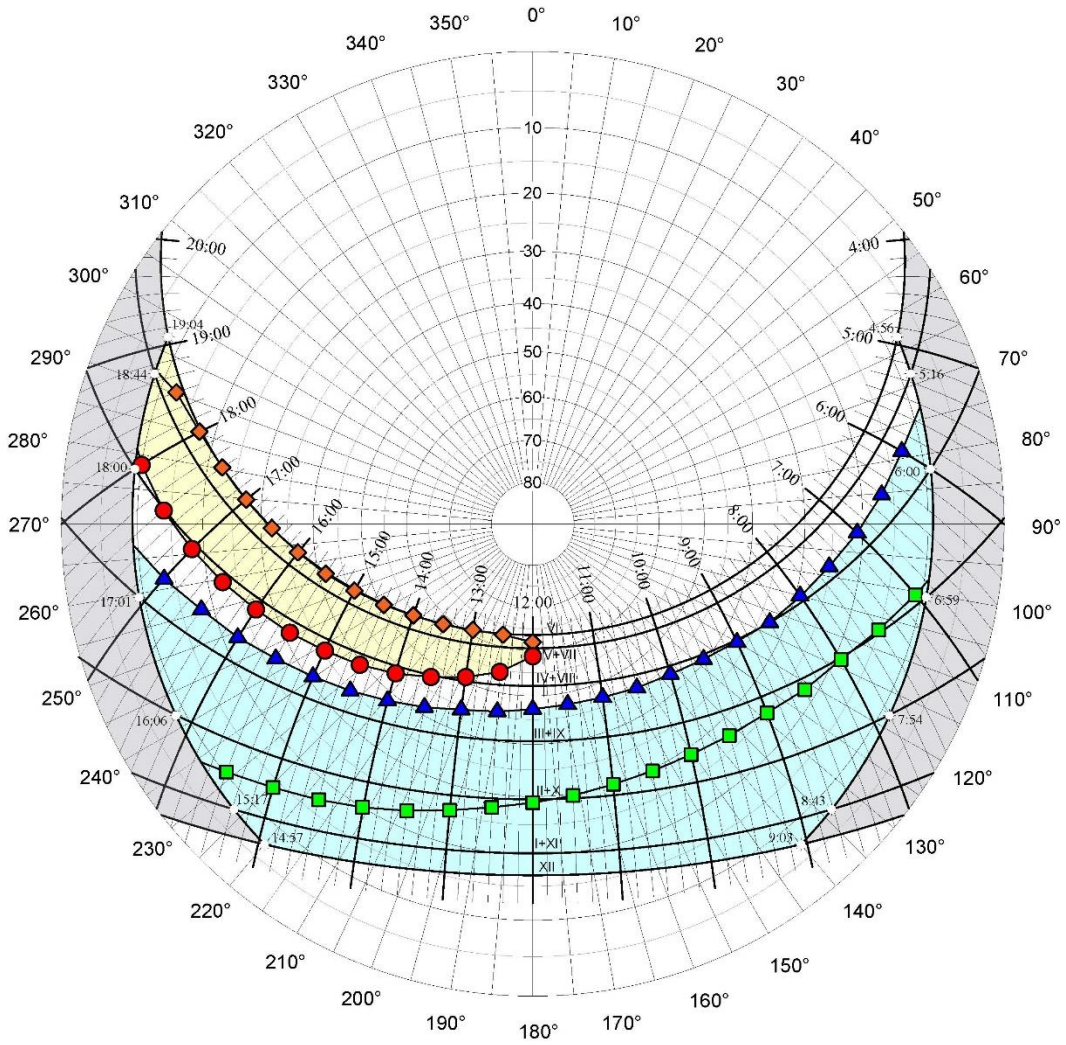


Fig. 2. Complex polar sun-path diagram for the city of Lviv (49.84° N) with zones of overheating and underheating: the line of the beginning of spring overheating is marked with diamond-shaped markers, the line of the end of overheating in autumn is marked with circular markers, the line of the beginning of underheating in autumn is marked with square markers, the line of the end of underheating in spring is marked with triangular markers

Conclusions

1. The developed sun-path diagram for the city of Lviv with the defined zone of potential overheating under insolation and the zone of desirable insolation can be used to design optimal solar shading devices in this city.
2. To determine temperature zones on the complex sun-path diagram, it is sufficient to use the first five harmonics of the Fourier series expansion of the annual temperature variation.

References

1. DSTU-N B V.2.2-27:2010. Nastanova z rozrakhunku insolyatsiyi ob'yektiv tsyvil′noho pryznachennya [National Standard of Ukraine Н Б В.2.2-27:2010 "Guidelines for calculating Sunlight Exposure of civil facilities"]. Kyiv, 2010. 81 p. (in Ukrainian).
2. Sergeychouk O.V. Pobudova kompleksnykh sonyachnykh kart za normatyvnymy klimatychnymy danymy [Design of complex sun-path diagrams based on normative climatic data]. *Suchasni problemy modelyuvannya* [*Modern modeling problems*]. Melitopol: Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University, 2014. P. 149-153. (in Ukrainian).
3. DSTU-N B V.1.1-27:2010. Budivel′na klimatolohiya. [National Standard of Ukraine Б В.1.1-27:2010 "Building climatology"]. Kyiv, 2011. 123 p. (in Ukrainian).
4. Verzhbyts′ka P.V. Rozrobka kompleksnoyi sonyachnoyi karty dlya m. Odesa [Design of a complex sun-path diagram for the city of Odessa]. *Physical foundations of modern technologies in the construction industry*. Abstracts of the VII All-Ukrainian scientific-practical conference of higher education applicants and young scientists, April 6-7, 2023. Odessa: OSACEA, 2023. P. 151-157. (in Ukrainian). URL:http://pfmtci.org/Archive/2023/AbstractsPFMTCI2023/PFMTCI2023-151-157.pdf (last access 2026/03/26).
5. Navrotskiy N.V. Rozrobka kompleksnoyi sonyachnoyi karty dlya m. Kharkiv [Design of a complex sun-path diagram for the city of Kharkiv]. *Physical foundations of modern technologies in the construction industry*. Abstracts of the V All-Ukrainian scientific-practical conference of higher education applicants and young scientists, April 10, 2025. Odessa: OSACEA, 2025. P. 19-26. (in Ukrainian). URL: http://pfmtci.org/Archive/2025/AbstractsPFMTCI2025/PFMTCI2025-019-026.pdf (last access 2026/03/26).
6. Zaginaylo I.V., Navrotskiy N.V. Rozrobka kompleksnykh sonyachnykh kart mist Ukrainy [Design of a complex sun-path diagram for the Ukrainian cites]. *Aktual'ni problemy enerho-resursozberezhennya ta ekolohiyi* [*Current problems of energy and resource saving and ecology*.]. Materials of the VI International Scientific and Technical Conference. December 24-25, 2025. Odesa: OSACEA, 2025. P. 127-131. (in Ukrainian).
7. Jean Meeus. Astronomical Algorithms, Second Edition. Publisher: Willmann-Bell, 1999. 477 p.

UDC 691.327.3:699.844:699.86

ACOUSTIC AND THERMAL PERFORMANCE OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE: AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION

Kumar A.[1,a,*], **Sharma D.**[1,b]

[1] *Abhilashi University, Chailchowk, Mandi, Himachal Pradesh, India*

[a] *PhD student;* [b] *PhD, Prof., Dean (Faculty of Engineering and Management)*

[*] *Corresponding author:* abd187086@gmail.com

Abstract. *This study investigates the acoustic and thermal performance of structural lightweight concretes produced with 100 % recycled fired-clay brick coarse aggregate and a multi-component blended hydraulic binder containing two agro-derived siliceous additions (finely ground sugar-biomass ash and amorphous cereal-husk silica). Two mixes were examined: a high-performance mix for optimised strength and durability and an eco-optimised mix for cost-effectiveness. Low water-to-binder ratio with acrylic-polymer superplasticiser ensured target workability. Normal-incidence sound absorption was measured on 100 mm thick conditioned discs using the two-microphone transfer-function impedance-tube method (ISO 10534-2). Steady-state thermal conductivity was evaluated on ground rectangular plates by the heat-flow-meter technique (ASTM C518). Oven-dry densities, compressive strengths, and derived thermal indices were also determined. The developed concretes achieved oven-dry densities of 1650–1720 kg/m³ (25–30 % lighter than normal-weight concrete), 28-day compressive strengths of 32–55 MPa, noise-reduction coefficients (NRC) of 0.20–0.30, and thermal conductivity of 0.75–1.1 W $m^{-1}·K^{-1}$ (≈50 % lower than normal-weight concrete). These gains are attributed to the porous recycled-aggregate skeleton and the gel-rich matrix formed by the multi-component binder. The mixes simultaneously deliver high recycled content (30–42 %), significant clinker reduction (20–30 %), and improved thermo-acoustic performance while meeting load-bearing requirements.*

Keywords: *structural lightweight concrete, recycled fired-clay brick aggregate, multi-component SCM binder, sound absorption, thermal conductivity, sustainability*.

Introduction Lightweight concrete reduces self-weight and improves seismic performance while offering superior thermal insulation and acoustic absorption compared with normal-weight concrete. In modern reinforced concrete buildings, acoustic comfort and energy-efficient thermal performance are essential for occupant productivity and reduced heating/cooling demand. Supplementary cementitious materials (SCMs) and recycled aggregates also lower the environmental footprint by reducing clinker content and diverting demolition waste. Although many studies have examined either acoustic or thermal behaviour of lightweight concretes separately, integrated investigations combining structural performance, sound absorption, thermal

transport, and sustainability in a single recycled-brick system with multi-component binders remain limited. This study addresses that gap by experimentally assessing two structural lightweight concretes using 100 % recycled fired-clay brick coarse aggregate and a multi-component binder rich in industrial and agro-derived SCMs.

Materials and Methods. The binder system consisted of a commercial pozzolanic cement, ultrafine latent-hydraulic slag powder, sugar-biomass ash, and cereal-husk silica. Recycled low-density fired-clay brick served as 100 % coarse aggregate; river sand was used as fine aggregate. An acrylic-polymer superplasticiser controlled workability at low water-to-binder ratios. Two mixes were designed: high-performance (target M50+) and eco-optimised (target M30–M40). Specimens were mixed in a laboratory pan mixer, cast in steel moulds, and water-cured. Density and compressive strength followed standard procedures for structural lightweight concrete. Sound absorption was measured per ISO 10534-2 on conditioned 100 mm discs using the transfer-function impedance-tube method. Thermal conductivity was determined per ASTM C518 on ground plates. All tests used at least three replicates.

Results and Discussion. The developed concretes satisfied structural lightweight requirements with oven-dry densities of 1650–1720 kg/m³ and 28-day compressive strengths of 32–55 MPa. Normal-incidence absorption coefficients in the 500–1000 Hz band reached 0.15–0.25, yielding NRC values of 0.20–0.30 (versus 0.05–0.10 for normal-weight concrete). Steady-state thermal conductivity was 0.75–1.0 W $m^{-1} \cdot K^{-1}$ for the high-performance mix and 0.8–1.1 W $m^{-1} \cdot K^{-1}$ for the eco-optimised mix – approximately 50 % lower than the 1.6–2.0 W $m^{-1} \cdot K^{-1}$ typical of normal-weight concrete. The porous recycled-aggregate skeleton combined with the gel-rich matrix produced by the multi-component binder provided the observed synergy between acoustic damping, thermal moderation, and structural capacity. Sustainability indicators showed 20–30 % clinker reduction and 30–42 % total waste-derived content. Cost–benefit analysis confirmed practical viability for both high-load and large-volume applications.

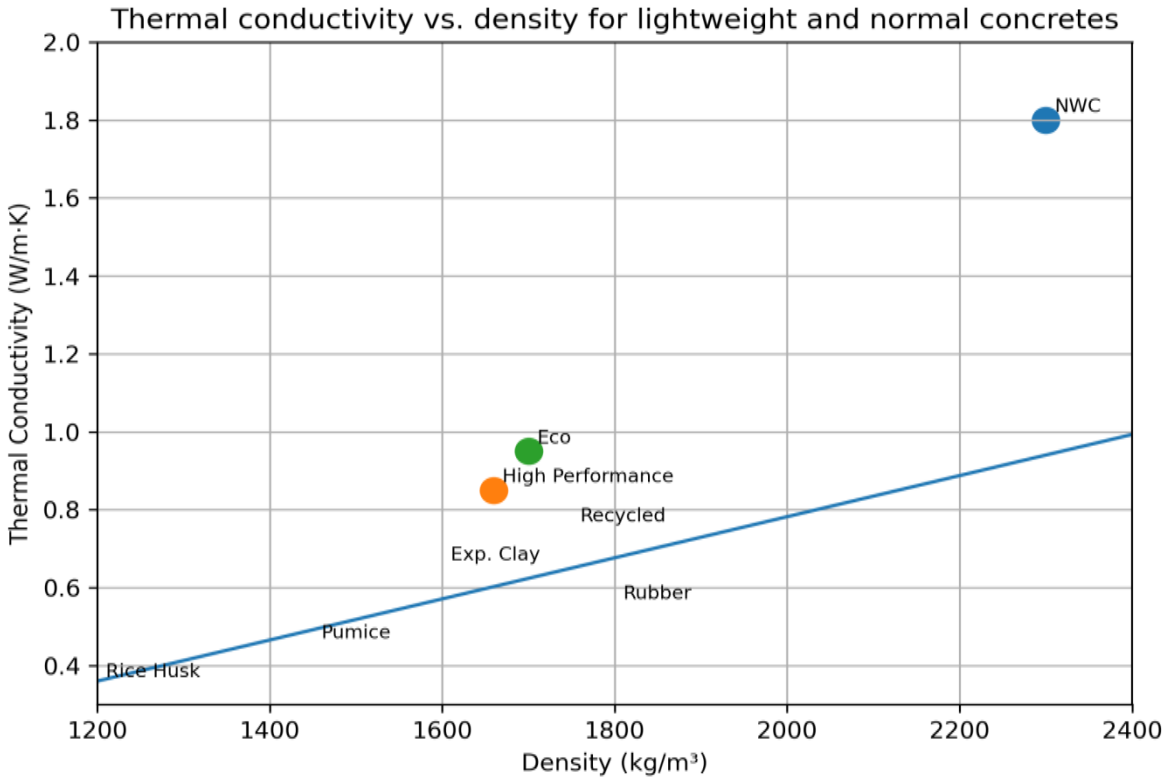


Fig.1 Comparison of thermal conductivity vs. density

Conclusion. The structural lightweight concretes developed with recycled fired-clay brick aggregate and multi-component SCM binder achieve a synergistic combination of mechanical strength, superior thermo-acoustic performance, and high sustainability. The high-performance mix is recommended for seismic-critical or heavily loaded elements; the eco-optimised mix suits cost-sensitive applications. These materials offer a viable, nature-aligned alternative that reduces building dead loads, operational energy demand (estimated 5–15 %), and environmental impact without compromising structural integrity.

References

1. Bogojević D, Vatin N, Milićević I. Sustainability analysis of lightweight concrete technologies. *Eng Sci Technol Bull*. 2023;13(1):45–59.
2. Phattharachai K, Chaimoon K, Jaturapitakkul C. Thermal and acoustic properties of sustainable structural lightweight aggregate rubberized concrete. *J Therm Anal Calorim*. 2022;147(4):3069–82.
3. Brito FA, Ferreira RLS, Silva FJ. Environmental life cycle assessment of lightweight concrete. *J Clean Prod*. 2023;401:136873.
4. Yang S, Lee J, Kim H. Sound absorption and thermal insulation performance of porous concrete for building envelopes. *Constr Build Mater*. 2021;301:124106.

5. Martínez-Martínez C, Galán-Marín C, Roldán-Carmona M. Thermal properties of lightweight concrete with recycled aggregates. *Constr Build Mater*. 2021;302:124189.
6. Domagała M. Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete with recycled brick aggregate. *Materials*. 2025;18(3):678.
7. Ulucan Z, Alyamaç E. Structural lightweight concrete with recycled clay brick aggregate. *Constr Build Mater*. 2024;411:134567.
8. Neville AM. Properties of concrete. 5th ed. Pearson; 2019.
9. ISO 10534-2:2023 Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method. International Organization for Standardization; 2023.
10. ASTM C518-21 Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. ASTM International; 2021.

UDC 711.4:556.18:528.9

SPATIAL MODELING OF URBAN CATCHMENT USING QGIS FOR GREEN INFRASTRUCTURE PLANNING

Raghad Awad[1,a,*], **Štefan Stanko**[1,b]

[1] *Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia*

[a] *Ing.;* [b] *PhD, Prof.*

[*] *Corresponding author: Raghad.Awad@stuba.sk*

Abstract. *Urbanization and climate change are increasing impervious surfaces, leading to higher stormwater runoff, reduced infiltration, and environmental stress on urban drainage systems. Green Infrastructure represents a sustainable approach to improving urban stormwater management by improving both hydraulic performance and ecological functionality. This study aims to identify the most suitable locations for green infrastructure implementation based on existing system performance, thereby supporting detailed and informed planning. Catchment delineation and hydraulic characterization were conducted using MIKE+ software, while spatial analysis and visualization were performed in QGIS. Imperviousness was assessed at the catchment scale to evaluate surface conditions influencing runoff generation. This study focuses on mapping impervious surfaces in urban sub-catchments to identify areas with higher potential for runoff generation. The combined analytical workflow enabled the identification of critical zones with elevated runoff potential and reduced infiltration capacity. Results indicate that prioritizing areas with high imperviousness and significant peak flow contribution provides a robust basis for strategic BGI placement. The proposed methodology establishes a reproducible, data-driven framework that links hydrological assessment with spatial prioritization, facilitating optimized resource allocation and supporting the development of climate-resilient and sustainable urban drainage systems.*

Keywords: *impervious surfaces, stormwater runoff, urban catchments, green infrastructure, spatial modeling, climate change.*

Introduction. Rapid urbanization and climate change are placing unprecedented pressure on cities worldwide, with increased impervious surfaces leading to higher stormwater runoff, flooding, air and water pollution, and elevated urban temperatures. Increasing impervious surfaces, such as roads and rooftops, reduce groundwater infiltration, elevate surface runoff, and strain urban drainage systems. These effects, compounded by the growing impacts of climate change, have led to heightened flood risks in many urban areas. In Slovakia, a frequent manifestation of climate change over the past 15 years has been extreme daily torrential rainfall events, with increasing frequency. Another recent intense rainfall event that affected the capital city and the western part of Slovakia Záhorie occurred in September 2024. Urban stormwater under such conditions poses significant risks, including street flooding and the discharge of

untreated wastewater into natural waterways during heavy rainfall events, often caused by Combined Sewer Overflows (CSOs). Mitigating these risks is particularly challenging in many urban areas because impervious surfaces dominate, buildings constrain natural infiltration, and stormwater is typically channeled into a single sewer network of limited capacity. These factors increase peak runoff and reduce the ability of urban systems to absorb and retain water, amplifying the likelihood of flooding and pollution during extreme events. Climate change further compounds this problem by increasing the intensity and frequency of short-duration, high-intensity rainfall events, which place additional stress on aging drainage infrastructure. The importance of this issue is highlighted by the fact that many urban drainage systems in Slovakia were designed based on data from 1955 to 1985.The increase in meteorological extremes is further supported by studies in Slovakia, which indicate that the intensity of short-duration precipitation events in the 21st century may increase by several percent up to tens of percent [1]. Such an increase is expected to result in more frequent situations where existing sewer networks are unable to function effectively. One potential approach to this problem is to expand the sewerage network and increase its capacity. However, this solution is often costly, may not be technically feasible in all areas. Alternative methods to reduce the load on stormwater networks primarily involve the implementation of Green and Blue-Green Infrastructure (BGI), such as green roofs, permeable pavements, rain gardens, and retention basins. Quantifying the interactions between urbanization, stormwater runoff, and climate change requires rigorous, data-driven analysis that integrates environmental monitoring with hydrological and hydraulic modeling. From a European perspective, this approach is reinforced by Article 5 of the Urban Wastewater Directive, which obliges Member States to develop integrated urban wastewater management plans for medium and large urban agglomerations. These plans define compliance with timelines, require updates every six years, and must be submitted to the European Commission [2]. (European Commission, 2023). The directive prioritizes the adoption of nature-based solutions referred to as BGI to reduce pollution, manage stormwater, and increase urban resilience [3]. This study focuses on the catchment of Kysucké Nové Mesto, located in the Žilina Region situated in northern Slovakia, near the confluence of the Kysuca and Váh rivers. As part of the Žilina metropolitan area, Kysucké Nové Mesto has experienced moderate urban growth, resulting in increased impervious surfaces and higher stormwater runoff. The main objective of this study is to identify and prioritize suitable locations for BGI implementation in the catchment. This research provides a data-driven framework for strategic BGI placement, offering a methodology that can be applied to similar towns and urban areas facing comparable challenges.

Materials and Methodology. The study was conducted in Kysucké Nové Mesto, a district town in northern central Slovakia in Žilina Region, covering an area of 2,641 ha with a population of approximately 14386 inhabitants. The area is characterized by a moderately warm climate in valley regions and colder conditions in higher elevations, with average annual precipitation ranging from 750 to 1000 mm and an average annual temperature of approximately 8°C. The most precipitation falls in July, the least in January. The absolute maximum of monthly precipitation totals in the period 1951 – 2000 ranged from 250 to 300 mm in the majority of the cadastral area of the city. The ratio between the driest and wettest month of the year is 1:2. More than 60% of precipitation falls in the narrower growing season (April – September). The highest daily precipitation totals occur in June to August during summer storms (10 mm to 190 mm per day). Characteristics of the site of interest Kysucké Nové Mesto is a district town located in the Žilina Region, it is the economic and cultural center of lower Kysuce and is the oldest town in Kysuce. The city covers an area of 2,641 hectares and has a population of approximately 15,000 inhabitants. Kysucké Nové Mesto is located in the north of central Slovakia on the right bank of the Kysuca River, altitude 358 m above sea level. The area of Kysucké Nové Mesto geographically falls into the Javorníky Mountains and the Kysucká Highlands, the highest peak of which is Ľadonhora (999 m above sea level). The territory of Kysucké Nové Mesto belongs to the basin of the Váh River and is drained by the Kysuca River. The flow characteristics of the Kysuca River average discharge is 17.2 m^3/s. In addition to the Kysuca River, several major streams flow through the cadastral territory of the city - the Radoľčanka stream, the Suľkov stream, the Neslušanka and its tributary Žeriavka. The study area consists of a combined sewer system with a length of 34 371 m that has developed gradually over time, resulting in heterogeneously varied technical conditions. The sewer system of Kysucké Nové Mesto is predominantly combined, conveying wastewater, Rainwater, and industrial effluents within a single network. In addition to domestic wastewater from residents and stormwater from adjacent roads and impervious surfaces, the system also receives wastewater from both industrial and non-industrial organizations located within the city. The main collectors in the city are sewers A and B; each associated with their respective catchments. The combined sewer system also consists of 7 overflow chambers (OK1–OK7).[4] These objects are also specified in the hydrodynamic model of the sewer network.

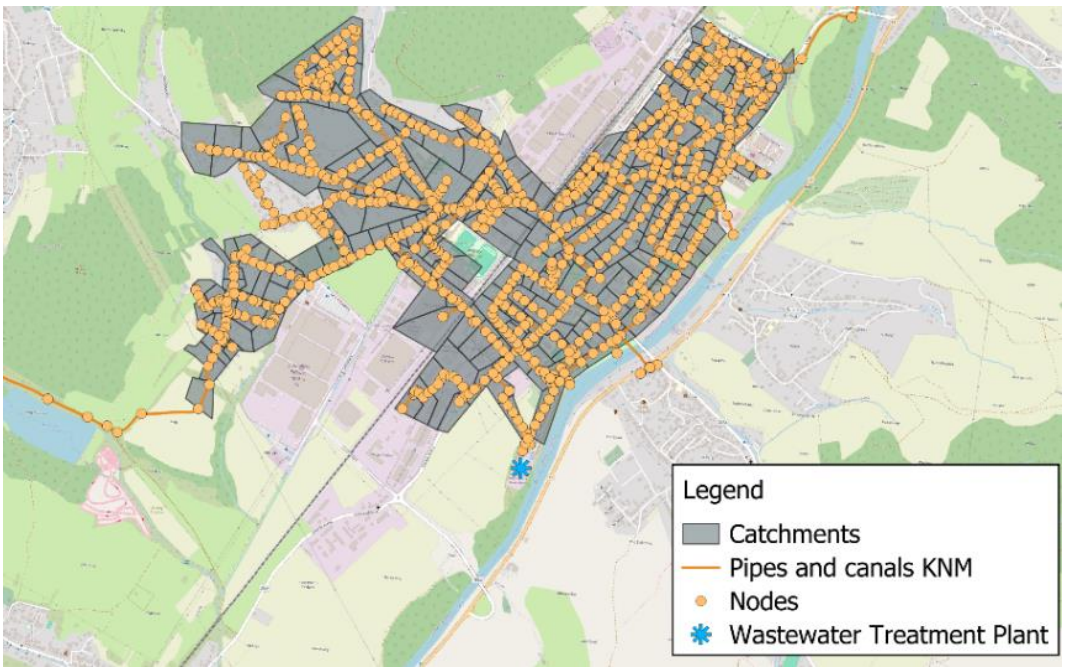


Fig. 1. Catchment study area in QGis assigned with links, nodes and wastewater treatment plant

The problem with the city's sewer system lies in the performance of some main collectors during rainfall events and the overflow chambers in terms of relieved waters. Infiltrated waters may also represent a systemic problem. Another issue is the low capacity of the network in some areas, mainly at the city's outskirts, which is caused by unplanned urban development without corresponding network expansion. The low capacity also leads to problems with some of the collectors. The study utilized MIKE+ developed by DHI for comprehensive hydrological and hydraulic modeling of the sewer system. Spatial analysis was performed using QGIS to calculate catchment imperviousness and identify areas with the highest impervious surface ratios. Hydrological transformation in MIKE+ was carried out using the time–area method, while catchment delineation was performed using the Thiessen polygon approach, resulting in 298 sub-catchments. Model Imperviousness for each catchment was computed in MIKE+ using the catchment processing tool based on land use characteristics [5]. Spatial datasets, including buildings, roads, and parking areas, were integrated as shapefiles. From the catchment processing tool, Threshold impervious values were assigned in order to compute model imperviousness.

The model subsequently calculated the geometric area and imperviousness percentage for each sub-catchment along with other parameters such as concentration time, initial loss and slope. Further processing in QGIS enabled the calculation of total impervious surface area by combining catchment area and imperviousness values. The results were visualized using graduated symbology to classify catchments based on

imperviousness levels. Catchments exhibiting the highest imperviousness and peak runoff contributions were identified as priority zones for green infrastructure implementation.

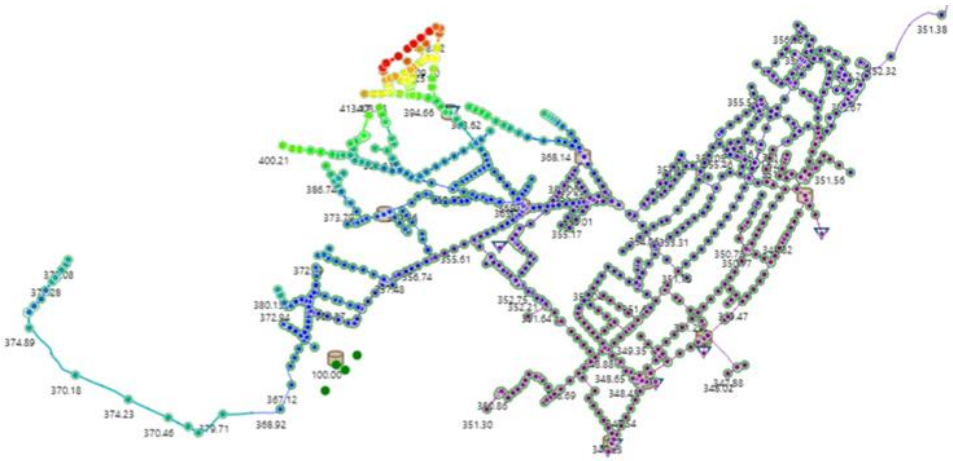


Fig. 2. MIKE+ hydrodynamic simulation of the sewerage network

Results and Discussion. Impervious scalability from low to high has been indicated and denoted on QGIS as shown. Whereas the highest areas potent to high permeability are indicated in red color shown as critical zone areas shown in figure 3. The total area of impervious surfaces within the catchment is 62.5 ha. The maximum impervious surface was 1.563 ha. Figure 4 shows the specific areas for green infrastructure implementation on those critical zones. Some green infrastructure measures can include green roofs on buildings, classified as extensive or intensive depending on the area. Permeable pavements can be applied in parking lots to increase infiltration. For areas outside the sewer network such as the industrial zones not connected to the catchment, nodes, or pipes, detention basins can be modeled to manage runoff and reduce peak flows. Detention basins can be implemented to temporarily store stormwater, reduce peak flows, and gradually release runoff into downstream waterways. The proposed measures do more than simply mitigate flood risk; they restore the natural water cycle through enhanced infiltration and evapotranspiration. Ultimately, this multi-tiered GI framework transitions the catchment from a rigid, "gray" drainage system to a resilient "blue-green" landscape, ensuring long-term climate adaptability and a significant reduction in the cumulative hydrological footprint of the built environment. While the current QGIS analysis provides a robust spatial framework, MIKE+ allows for the dynamic testing of Low Impact Development (LID) parameters to determine the most effective runoff mitigation scenarios.

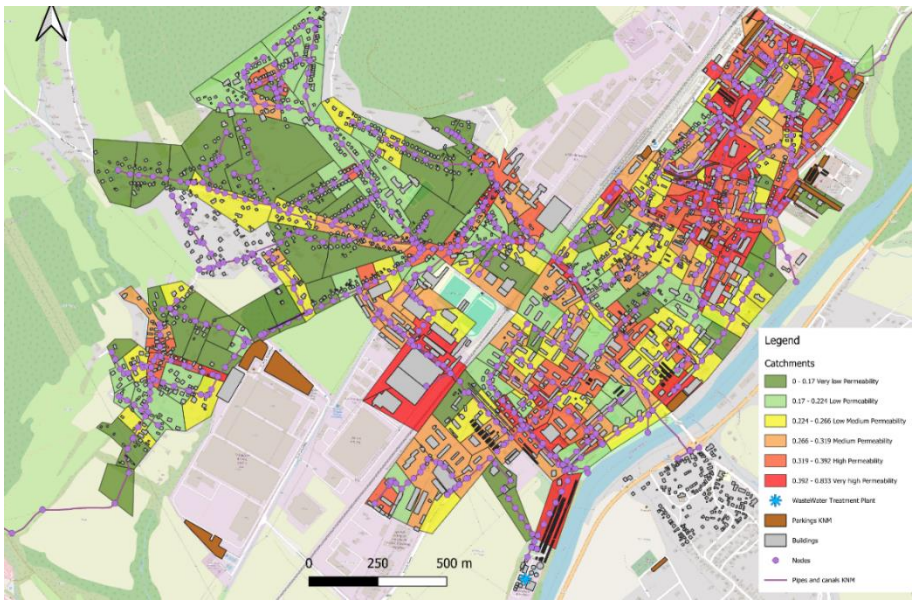


Fig. 3. Spatial Modelling of the catchment featuring impermeability levels from low level to high level permeability, identifying critical zones indicated in red color

Fig. 4. Green infrastructure implementation in areas with critical hot spots showing green roofs for buildings that can be extensive or intensive and permeable pavements for parking lots

These scenarios will be subjected to the Block Rainfall methodology (Synthetic Rainfall) to test the system's resilience under various return periods and storm durations. "Future research will employ block rainfall simulations to stress-test different Low Impact Development (LID) scenarios. This approach will facilitate a comparative analysis to determine if a single-measure strategy (e.g., universal extensive greening) or a multi-criteria hybrid configuration (combining intensive green

roofs, extensive green roofs, and permeable pavements) yields the superior reduction in peak discharge for the identified hotspots

Conclusion. This study established a robust spatial framework for urban drainage analysis by integrating the catchment processing capabilities of MIKE+ with the advanced visualization of QGIS. By employing the Thiessen polygon approach within MIKE+, the area was delineated into 298 sub-catchments, allowing for a granular assessment of surface characteristics. The application of the catchment processing tool enabled the calculation of physical parameters including slope, concentration time, and initial loss while assigning specific impervious thresholds. The resulting "Critical Zone" map (Figure 7) successfully pinpointed hotspots where imperviousness reaches a maximum of 1.563 ha, representing the highest potential for peak runoff generation within the system. These findings provide a data-driven foundation for the strategic placement of Green Infrastructure. By identifying where imperviousness is most concentrated, this methodology allows urban planners to prioritize "at-source" interventions—such as green roofs and permeable pavements to restore natural infiltration. While this study provides spatial evidence for intervention, future research will build upon this foundation by using Mike+ block rainfall simulations to test the hydraulic performance of specific LID scenarios, such as intensive versus extensive greening, to move from spatial potential to verified discharge reduction.

Acknowledgments. This work was supported by the Young Researchers Support Program under the project ‘Use of QGIS for the Calculation of the Blue-Green Factor and the Evaluation of Environmental Qualities of Urbanized Areas.’ The authors also acknowledge the use of data provided by Trymore, s.r.o., as well as the use of MIKE+ software under a student license provided by DHI Group.

References

1. Onderka M, Pecho J. Design values of short-term rainfall intensities in Slovakia National Climate Program of the Slovak Republic. 2023;17/22.
2. European Commission. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council concerning urban wastewater treatment (recast). Brussels: European Commission; 2022. COM (2022) 541 final.
3. European Environment Agency. Urban adaptation in Europe: what works? Implementing local actions on the ground. Copenhagen: EEA; 2022. *EEA Report* No. 12/2020 (Updated 2022).
4. North Slovak Water and Sewage Company (SEVAK)a.s.). Technical Data and Operational Standards for Sewerage Systems. Žilina: SEVAK; 2024.
5. DHI Slovakia. Technical Guide for Catchment Processing and Hydrological Parameterization in MIKE+. Bratislava: DHI Slovakia; 2024.

UDC 691.1:582.28:620.1

PHYSICAL PERFORMANCE OF MYCELIUM-BASED COMPOSITES FOR REGENERATIVE BUILDING DESIGN

Symonenko Ye.[1,a,*], **Babenko M.**[1,b], **Križo M.**[2]

[1] *Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Bratislava, Slovakia*

[2] *Institute of Ecological and Experimental Architecture, Faculty of Architecture and Design, Slovak University of Technology in Bratislava, Bratislava, Slovakia*

[a] *PhD student (EC);* [b] *PhD, Assoc. Prof. , Researcher*

[*] *Corresponding author: ecocompagnone@gmail.com*

Abstract. *In the context of the European transition towards climate-neutral construction by 2050, the reduction of environmental impacts associated with building materials has become increasingly relevant. This study investigates mycelium-based composites as a regenerative alternative to conventional insulation materials with high embodied energy and environmental burden. The research applies a combined methodology including a comprehensive analytical literature review, controlled development of composite samples, and experimental evaluation of physical properties. Mycelium-based composites were produced using lignocellulosic substrates, namely fine wood waste and hemp shives, inoculated with Ganoderma mycelium under controlled environmental conditions. The analysis identified key advantages such as low thermal conductivity. Experimental results demonstrate that material density significantly influences performance, with wood-based samples exhibiting higher densities and hemp-based samples providing lighter structures suitable for non-load-bearing insulation applications. The measured thermal conductivity ranged from 0.0488 to 0.0722 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, showing a clear correlation with density. The findings confirm the potential of mycelium-based composites as low-impact insulation materials and highlight density optimization as a critical parameter for improving performance while reducing environmental footprint.*

Keywords: *construction materials, physics, modern technologies, mycelium*.

Introduction. As a part of unified European commitment to achieve climate-neutrality by 2050, the directive (EU) 1275/2024 focuses on the construction sector. As one of the major contributors to global greenhouse gas emissions and resource consumption, the building industry is required not only to improve energy efficiency but also to reduce the overall environmental footprint of materials used throughout a building's life cycle [1, 2].

Within regenerative design frameworks, building materials are increasingly understood not merely as passive components but as active agents in restoring ecological balance through low-impact sourcing, reduced embodied energy, and end-of-life biodegradability. Insulating materials are considered as one of the methods used

for improving the building's performance. Their implementation results in the energy consumption, increased inhabitants' comfort and improved long-term service. Nonetheless, independent life-cycle studies have identified significant environmental concerns regarding the conventional substances, including expanded polystyrene (EPS) and mineral wool [3, 4, 5].

The growing need to substitute resource-intensive insulation materials has led to increased research into bio-based and regenerative alternatives. The renewable insulation materials are already being applied and are responsible for 2-5% of the trade. This number keeps rising, so that this niche is expected to rapidly expand and could exceed 10% of the total insulation materials market by 2030 [6, 7].

Mycelium-based composites (MBCs), as biodegradable and bio-fabricated materials, demonstrate considerable potential within regenerative building design. In the context of climate-neutral construction and the increasing demand for low-impact material solutions, the systematic study of MBCs is particularly timely due to their low embodied energy, biodegradability, and compatibility with circular material systems [8, 9, 10].

This study is focused on following stages: deep analytic literature review; development of mycelium-based composite samples; analyzing their physical properties; and exploring potential solutions for issues that do not allow MBCs' entry widely to the European stock market.

Materials and Methods. Even though numerous separate studies have been conducted recently, published results remain not integrated enough. Consequently, before choosing specific fungal species and forming exact specimens, a comprehensive analytic review of the topic was crucial. During the analysis, the main advantages, including low thermal conductivity values and decent acoustic absorption, as well as key disadvantages, such as high-water permeability, were identified. Furthermore, the review revealed consistent trends indicating a relation between versatile reinforcement types and the resulting properties' modification [11, 12].

Two types of lignocellulosic substrates–fine-fraction wood waste and hemp shives-were used in combination with *Ganoderma* mycelium to produce mycelium-based composite samples. The composites were fabricated under strictly controlled environmental conditions to ensure reproducibility and consistency of material development. All stages of composite formation, including inoculation, incubation, and drying, were carried out under controlled temperature, humidity, and time parameters.

Fig. 1. The process of thermal conductivity analysis on own-created specimens

Results and Discussion. The study showed that the density strongly influenced the performance of the mycelium-based composites, with wood-based samples exhibiting higher densities (183.33–436.11 $kg \cdot m^{-3}$) and hemp-based samples showing substantially lower values (85–98.7 $kg \cdot m^{-3}$). Compared to conventional mineral wool (60-200 $kg \cdot m^{-3}$), hemp-based MBCs demonstrated a favourable range for non-load-bearing insulation applications. The obtained thermal conductivity values ranged from 0.0488 to 0.0722 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. A clear linear correlation between density and thermal conductivity was observed, identifying density optimization as a key parameter for developing regenerative insulation materials with reduced material input and environmental impact.

Where each sample code is structured as **X n.m**, so that:

X (Substrate Type):

- **H** - Mycelium-Based Composite (MBC) on hemp shives substrate.
- **W** - Mycelium-Based Composite (MBC) on wood sawdust substrate.
- **M** - Mixed (Hemp + Wood) substrate.

n (Additive Content): Indicates the mass fraction of mineral additives.

- **1** - Pure composite (control group, 0% additives).
- **2** - Composite modified with **10% clay** additive.
- **3** - Composite modified with **30% clay** additive.

m (Specimen ID): Represents the specific sample number within a test batch.

- **1** - Sample No. 1.
- **2** - Sample No. 2.
- **3** - Sample No. 3.

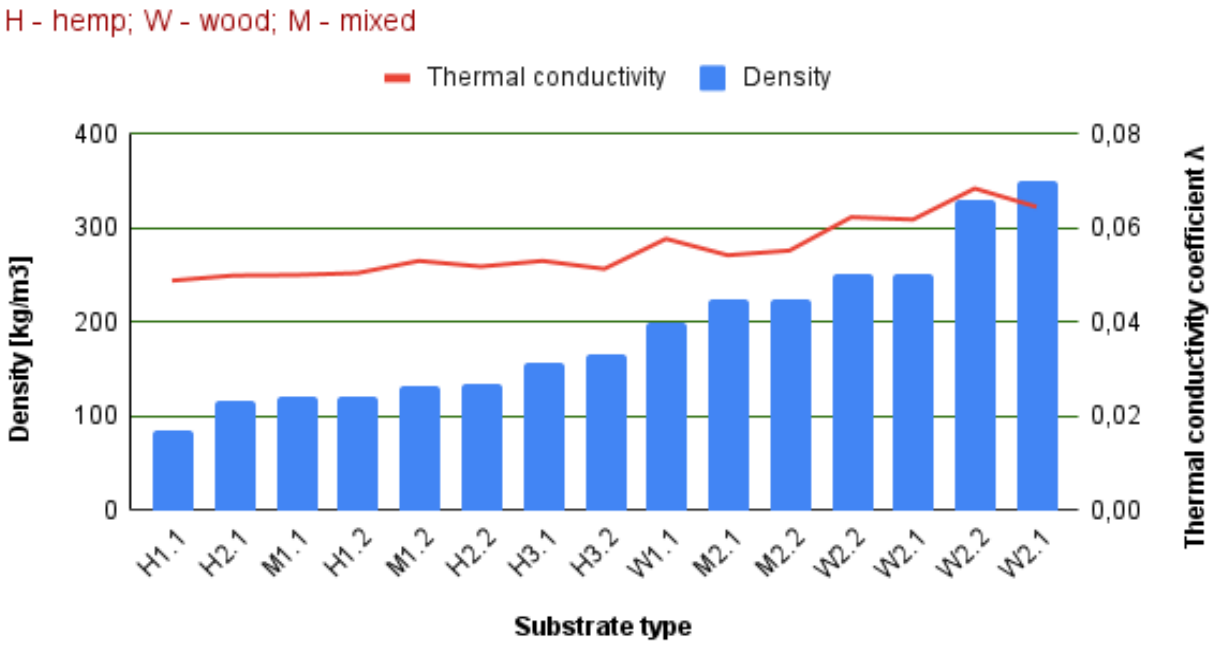


Fig. 2. Thermal conductivity variation according to density and substrate type

This study continues researching treatment methods of MBCs and looking for presumable ways to deal with moisture content and permeability issues. In particular, the upcoming SEM-analysis is expected to reveal differences in the hyphal sizes and connectivity regarding time before drying. Preliminary results indicate that samples with longer growth periods exhibit higher moisture content than those dried earlier. Moreover, it aims to identify the most suitable fibers for the lignocellulosic substrates. Adding appropriate fiber reinforcement is expected to increase the MBCs' structural stability, lower the water absorption rate and make it an even more viable alternative to the conventional insulators.

Conclusion. This study confirms that mycelium-based composites represent a promising regenerative alternative to conventional insulation materials in the context of climate-neutral construction. The main findings demonstrate that these bio-fabricated materials can achieve competitive thermal performance, with measured thermal conductivity values in the range of 0.0488 to 0.0722 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, comparable to commonly used insulation solutions. A key result is the clearly identified correlation between density and thermal conductivity, indicating that density optimization is a critical parameter for tailoring material performance. Additionally, the comparison of substrates shows that hemp-based composites, due to their lower density, are particularly suitable for lightweight, non-load-bearing insulation applications, while wood-based composites offer higher structural compactness.

In practical terms, these results can support the development of sustainable insulation materials for use in building envelopes, particularly in applications where

low environmental impact and end-of-life biodegradability are prioritized. From a scientific perspective, the study contributes to a more integrated understanding of mycelium-based materials and provides a basis for future research focused on improving durability, moisture resistance, and standardization. Overall, the work supports the transition towards regenerative construction practices by demonstrating viable pathways for reducing the environmental footprint of building materials.

References

1. European Commission. “Energy performance of buildings.” Policies, information and services. (EC, 2019). Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings_en
2. Maduta, Carmen, et al. "Towards climate neutrality within the European Union: Assessment of the energy performance of buildings directive implementation in member states." *Energy and Buildings*, 301 (2023): 113716.
3. Mandel, Tim, et al. "Investigating pathways to a net-zero emissions building sector in the European Union: what role for the energy efficiency first principle?". *Energy Efficiency*, 16.4 (2023): 22.
4. Alaux, Nicolas, et al. "Whole-life greenhouse gas emission reduction and removal strategies for buildings: Impacts and diffusion potentials across EU Member States." *Journal of environmental management*, 370 (2024): 122915.
5. Füchsl, Stefan, Felix Rheude, and Hubert Röder. "Life cycle assessment (LCA) of thermal insulation materials: A critical review." *Cleaner Materials*, 5 (2022): 100119.
6. Michalak, Jacek, et al. "Environmental burdens of external thermal insulation systems. Expanded polystyrene vs. mineral wool: Case study from Poland." *Sustainability*, 12.11 (2020).
7. Llantoy, Noelia, Marta Chàfer, and Luisa F. Cabeza. "A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate." *Energy and Buildings*, 225 (2020): 110323.
8. Schulte, Maximilian, et al. "Comparative life cycle assessment of bio-based insulation materials: Environmental and economic performances." *GCB Bioenergy*, 13.6 (2021): 979-998.
9. Raja, Pradeep, et al. "A review of sustainable bio-based insulation materials for energy-efficient buildings." *Macromolecular Materials and Engineering*, 308.10 (2023): 2300086.
10. Candido, Alessia, et al. "Mycelium-wood composites as a circular material for building insulation." *Frontiers in Sustainable Cities*, 6 (2024): 1412247.
11. Livne, Achiya, et al. "Fungal mycelium bio-composite acts as a CO_2-sink building material with low embodied energy." *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10.37 (2022): 12099-12106.
12. Alaneme, Kenneth Kanayo, et al. "Mycelium based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications." *Alexandria Engineering Journal*, 83 (2023): 234-250.

УДК 666.94

CLINKER-EFFICIENT CONCRETES BASED ON LOW-EMISSION CEMENTS

Kotsii O. R.[1,a], **Voznyi D. P.**[1,b], **Sanytsky M. A.**[1,c,*]

[1] *Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

[a] *PhD student at the Dept. of Building Production;* [b] *2nd-year student;* [c] *DSc, Prof., Head of the Dept. of Building Production*

[*] *Corresponding author: Myroslav.A.Sanytskyi@lpnu.ua*

Abstract. *The article presents the results of research on the physical and mechanical properties of fine-grained mortars and heavy concretes based on low-carbon cements CEM II/B-M(V-LL) 42.5R and CEM IV/B(P-V) 32.5R-SR produced by PJSC "Ivano-Frankivskcement". The effect of organo-mineral additives (OMA) and superplasticizers on the strength characteristics of cements and concretes has been investigated. It is shown that the introduction of OMA based on fly ash with a polycarboxylate superplasticizer provides an increase in compressive strength of CEM IV cement by 22%. The use of CEM II/B-M(V-LL) 42.5R with a complex of additives (Plastidor 548 + OMA) provides the highest compressive strength of 43.6 MPa with high workability (slump 22 cm), which creates the basis for the effective use of clinker-efficient cements in modern low-carbon construction.*

Key words: *clinker-efficient concretes, low-emission cements. physical and mechanical properties, superplasticizers, organo-mineral additives, wet fly ash.*

Relevance of the research. At the current stage of societal development, economic growth largely determines the need for increasing construction volumes, leading to a growing use of cementitious materials. Concrete is the second most used material on the planet after water, and cement production accounts for over 8% of global CO_2 emissions. The European Green Deal sets the course for achieving climate neutrality by 2050 [1]. The strategy of the European Cement Association (CEMBUREAU) specifies these goals for the industry: a 30% reduction in CO_2 emissions during cement manufacturing by 2030, and a 40% reduction at the stages of concrete production and construction [2]. In Ukraine, the transition to low-carbon cements is a key direction of sustainable construction and ensuring energy and environmental security, especially in the context of post-war infrastructure recovery.

State of the problem. Due to the tightening requirements for modern cements and concretes towards reducing CO_2 emissions, a number of environmental indicators are being introduced to assess their impact on the environment. The potential for reducing CO_2 emissions in building production is achieved by optimizing the use of binders with the application of modern technological solutions. In this regard, clinker

intensity and CO_2 intensity indicators are used, which characterize the efficiency of clinker utilization in the production of concrete of a given strength [3]. One of the ways to reduce CO_2 emissions is the development of eco-efficient cements with reduced clinker content [4]. The use of supplementary cementitious materials (SCM) – wet fly ash (WFA), limestone, pozzolans – in the composition of composite Portland cements of CEM II type and pozzolanic cements of CEM IV type allows a significant reduction of the clinker factor while maintaining the required performance characteristics [5]. Modern building production requires high-tech and high-performance concretes with improved rheological and strength characteristics. This raises the question of effective use of polycarboxylate-type superplasticizers (PCE), which provide a significant water-reducing effect in concrete mixes [6]. At the same time, complex organo-mineral admixtures (OMA) are of considerable scientific and practical interest. The concept of producing concretes with OMA was formulated in 1986. Concretes with OMA are characterized by high strength (R_{28} = 120 MPa and above), frost resistance (F400 and above), water impermeability (W12 and above), high chemical resistance, and low water absorption (less than 2.5% by mass) [7]. In building production technology, organo-mineral admixtures based on fly ash as an inorganic plasticizer and chemical plasticizers are used, which improve the technological properties of concrete mixes and contribute to the increase of concrete strength.

Aim of the work. Investigation of the physical and mechanical properties of fine-grained mortars and heavy concretes based on low-carbon cements CEM II/B-M(V-LL) 42.5R and CEM IV/B(P-V) 32.5R-SR with evaluation of the effect of organo-mineral admixtures (OMA) and superplasticizers on their strength characteristics.

Results obtained. Two types of clinker-efficient cements were used for the research: composite Portland cement CEM II/B-M(V-LL) 42.5R with a total mass fraction of fly ash (V) and limestone (LL) from 21% to 35%, as well as sulfate-resistant pozzolanic cement CEM IV/B(P-V) 32.5R-SR. Both cements provide a 30% reduction in CO_2 emissions and a 25% reduction in energy consumption compared to conventional CEM I.

Composite Portland cement CEM II/B-M(V-LL) 42.5R is characterized by the following physical and mechanical properties: compressive strength at the age of 1 day – 16.0 MPa, 2 days – 29.0 MPa, 28 days – 54.0 MPa (with a standard requirement of ≥ 42.5 MPa); initial setting time – 180 min (standard ≥ 60 min); sulfate content (as SO_3) – 2.69%. Pozzolanic cement CEM IV/B(P-V) 32.5R-SR is characterized by the following physical and mechanical properties: compressive strength at the age of 1 day – 10.0 MPa, 2 days – 16.0 MPa, 28 days – 46.0 MPa (with a standard requirement of ≥ 32.5 MPa); initial setting time – 170 min (standard ≥ 75 min); sulfate content (as

SO_3) – 2.55%; pozzolan and fly ash content – 50.0%.

As chemical admixtures, a polycarboxylate-type superplasticizer (PCE), sulfonated naphthalene formaldehyde (SNF), and calcium lignosulfonate (LS-Ca) were used. Organo-mineral admixtures (OMA) are complex modifiers containing active mineral components and chemical plasticizers. OMA in the amount of 3–5% by mass were introduced to improve the technological and strength characteristics of concrete mixes.

Investigation of fine-grained mortars based on CEM II/B-M(V-LL) 42.5R with Mykolaiv sand (C/S = 1:2.33) at W/C = 0.50 showed a standard compressive strength of 47.6 MPa at the age of 28 days. The introduction of 0.8% by mass of superplasticizer provided an increase in strength to 55.2 MPa at the same W/C. Reduction of W/C to 0.57 with superplasticizer addition provides a strength of 44.8 MPa, while at W/C = 0.70 without admixture the strength is 29.4 MPa.

For pozzolanic cement CEM IV/B(P-V) 32.5R-SR, the effect of different types of organo-mineral admixtures (OMA) on the physical and mechanical properties of cement was investigated. As shown in Table 1, the introduction of OMA with a polycarboxylate superplasticizer provides the highest increase in compressive strength to 55.4 MPa at the age of 28 days with a significant increase in cone spread. Admixtures based on sulfonated naphthalene formaldehyde and calcium lignosulfonate also increase the compressive strength to 48.6 and 49.2 MPa, respectively.

Table 1

Physical and mechanical properties of cement CEM IV/B(P-V) 32.5R-SR

Composition	W/C	CS, mm	CS_{60}, mm	Flexural/compressive strength, MPa, at age, days			
				1	2	7	28
CEM IV/B(P-V) 32,5R-SR	0,5	175	170	5,05/16,4	5,81/20,6	6,97/34,0	9,58/45,4
CEM IV + OMA 3% (WFA+ PCE)	0,5	217	197	5,35/16,8	6,36/22,0	6,86/37,3	7,18/55,4
CEM IV + OMA 3% (WFA + SNF)	0,5	189	180	4,78/16,8	4,85/23,4	5,87/35,6	7,55/48,6
CEM IV + OMA 3% (WFA+ LS-Ca)	0,5	187	176	4,53/17,6	6,52/22,6	7,02/34,8	8,17/49,2

For a comparative evaluation of the effectiveness of both cement types in heavy concretes, 3 mix designs were developed with a cement consumption of 300 kg/m³ and granite crushed stone of 2–5 mm and 5–20 mm fractions. The research results are presented in Table 2.

Table 2

Effect of cement type and admixtures on the strength of heavy concretes

Concrete mix	W/C	SL, cm	ρ, kg/m³	Compressive strength, MPa, at age, days				
				1	2	7	14	28
CEM IV/B(P-V) + PCE 0,8%	0,67	21,0	2387	10,7	15,8	20,9	29,3	35,3
CEM IV/B(P-V) + PCE 0,8% + OMA 5%	0,63	21,0	2390	9,8	20,7	28,0	34,9	39,6
CEM II/B-M + PCE 0,8% + OMA 5%	0,60	22,0	2375	10,3	21,3	31,3	39,9	43,6

Analysis of the results (Table 2) shows that the highest standard strength of 43.6 MPa (class C25/30) is achieved by concrete based on CEM II/B-M with a complex of admixtures (PCE 0.8% + OMA 5%), which exceeds the strength of the base mix on CEM IV/B(P-V) with PCE only (35.3 MPa) by 24%. The introduction of OMA into the mix with pozzolanic cement CEM IV increases the strength by 12% (from 35.3 to 39.6 MPa) with a reduction of W/C from 0.67 to 0.63. All three mixes have a workability class S4 (slump = 21–22 cm) at a density of 2375–2390 kg/m³, which confirms the high processability of the developed mixes.

A comparison of the two cement types shows that CEM II/B-M provides higher strength due to a greater clinker content (65–79%) and strength class 42.5R, while CEM IV/B(P-V) with a lower clinker factor and sulfate resistance is suitable for hydraulic engineering and aggressive environments. Both cement types reduce CO_2 emissions by approximately 25–30% compared to conventional CEM I.

Concretes based on CEM IV are characterized by intensive strength gain at later ages (increase from 14 to 28 days — 13%), which is due to the pozzolanic reaction of fly ash. In contrast, concrete based on CEM II/B-M demonstrates a more uniform kinetics with a high strength gain already from 2 to 7 days – 47%. Complex modification with PCE and OMA admixtures increases the density of the cementitious matrix and optimizes the pore structure, which corresponds to the concept of low-carbon building production.

Conclusions. 1. The physical and mechanical properties of fine-grained mortars and heavy concretes based on low-carbon cements CEM II/B-M(V-LL) 42.5R and CEM IV/B(P-V) 32.5R-SR have been investigated. It is shown that both cement types

provide concretes of strength classes C20/25–C25/30 at a cement consumption of 300 kg/m³, which confirms the possibility of their effective use in general building production.

2. The effectiveness of organo-mineral admixtures for modification of pozzolanic cement CEM IV/B(P-V) 32.5R-SR has been established. The highest increase in compressive strength is provided by OMA with a polycarboxylate superplasticizer, which simultaneously improves the rheological properties of cement mortars (cone spread increases from 175 to 217 mm).

3. The combined use of superplasticizer and OMA in concretes based on CEM II/B-M(V-LL) 42.5R ensures the achievement of standard strength while maintaining high workability. The developed concrete mixes meet the requirements of the sustainable development strategy and can be recommended for use in monolithic construction, repair and restoration works, and production of precast reinforced concrete structures.

References

1. The European Green Deal. Available online, 2020.
2. CEMBUREAU. Carbon Neutrality Roadmap – Cementing the European Green Deal: reaching carbon neutrality along the cement and concrete value chain by 2050. Brussels, 2020.
3. Sanytsky M.A., Kropyvnytska T.P., Geviuk I.M. Fast-hardening clinker-efficient cements and concretes: monograph. Lviv: Prostir-M Ltd, 2021. 206 p.
4. Scrivener K.L., Gartner E.M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry. *Cem. Concr. Res*., 2018, 114, 2–26.
5. Sanytsky M.A., Kropyvnytska T.P, Geviuk I.M. (2024). The effect of wet fly ash on the performance of low carbon concrete. 10th International Scientific and Technical Conference "Reliability and durability of railway transport engineering structures and buildings" Kharkiv, November 20-22, 2024, p. 226-227.
6. Sanytsky M., Kotsii O., Bobetskyy Yu., Kolodrub R. Effects of plasticizing admixtures on the performance of low-carbon concretes / *Theory and Building Practice*. – 2025. – Vol. 7, № 1. – C. 58-64
7. Hots V. I., Pavliuk V. V., Shyliuk P. S. Concretes and building mortars: textbook. Kyiv: Osnova, 2016. 568 p.

УДК 699.86:728.3

OPTIMIZATION OF ENERGY PERFORMANCE INDICATORS OF A BUILDING IN THE HISTORIC DISTRICT OF LVIV

Kornova R. V.[1,a], **Sanytsky M. A.**[1,b,*]

[1] *Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

[a] *2nd-year student;* [b] *DSc, Prof., Head of the Dept. of Building Production*

[*] *Corresponding author:Myroslav.A.Sanytskyi@lpnu.ua*

Abstract. *The paper solves the problem of optimizing the energy efficiency of a public building built in 1895, located in the G-2 development control zone of Lviv. It was established that a calcium silicate board 140 mm thick provides the regulatory thermal resistance R = 4.04 m² K/W at a safe humidity regime due to the capillary mechanism of moisture removal (μ = 2–3). The proposed set of thermal modernization measures provides an increase in the energy efficiency class from "G" to "E", a reduction in CO_2 emissions by 39 kg/m² and a payback period of 8 years while fully*.

Key words: *historic district of lviv, building, energy performance indicators, thermal modernization, optimization, specific CO_2 emissions historic district of lviv, building, energy performance indicators, thermal modernization, optimization, specific CO_2 emissions*

Relevance of research. The construction sector is one of the largest energy consumers in the world. According to the European Commission, buildings are responsible for about 40% of total energy consumption and over 36% of greenhouse gas emissions in the European Union [1]. In Ukraine, the situation is even more critical: about 80% of the housing and public buildings were built before 1990 according to outdated standards that did not provide for modern requirements for thermal protection of building envelopes. The average specific energy consumption of Ukrainian buildings is 2–3 times higher than similar indicators in EU countries, which causes excessive load on the energy system and high operating costs.

Review of prior studies. The problem of increasing the energy efficiency of cultural heritage buildings is actively researched at the international level. The IEA SHC Task 59 project "Renovating Historic Buildings Towards Zero Energy" [2] brought together researchers from 16 countries and formed a methodological basis for deep thermal modernization of historic buildings while preserving their authenticity. The key conclusion of the project is that a reduction in energy consumption by 50–80% is technically achievable for most types of historic buildings when an integrated approach is applied.

Objectives. The object of the study is a public building built in 1895, located at ul. A. Teslenko, 2, – a typical representative of the building stock of the late 19th century. The total area of the building is 1018.9 m², the construction volume is 5510 m³, the thickness of the external brick walls is 250–750 mm. After reconstruction, the building will be operated as an after-school education center. The analysis of heat losses showed that 71% of the total losses through the enclosing shell fall on the external walls, which determines the priority of thermal modernization measures.

The problem is complicated by the location of the building in the G-2 development regulation zone. According to the Law of Ukraine "On the Protection of Cultural Heritage" [3], changing the authentic appearance of facades in such areas is unacceptable, which excludes the use of standard external thermal insulation systems (ETICS) on the main facade and leaves internal insulation as the only permissible structural solution.

Aim of the work. The purpose of the study is to substantiate a comprehensive strategy for thermal modernization of a public building built in 1895, located in the historical part of Lviv, to achieve modern energy efficiency standards without changing the authentic appearance of the facades, with a scientific justification for the choice of an internal insulation system based on the criteria of heat and mass transfer and moisture safety..

Results. The thermal analysis of the existing building envelope was performed in the CadeePro software package following the methodology of DSTU 9190:2022, which is harmonized with EN ISO 52016-1. Thermal resistance values were verified against the minimum regulatory requirements of DBN V.2.6-31:2021 [4] for Climate Zone I (Lviv). The selection of the internal insulation system for the main façade was justified by a comparative hygrothermal analysis of two fundamentally different approaches – vapour-tight (polyisocyanurate board) and capillary-active (Multipor calcium silicate board) – supported by the fundamental work of Künzel [5] on simultaneous heat and moisture transport in building components. The moisture risk assessment for vapour-tight systems was informed by the DEEP Team report [6], which demonstrated that the breach of airtightness in internal insulation systems can drive the relative humidity at the material interface to 98% – a critical threshold for frost damage to brick masonry. Environmental performance was evaluated through specific CO_2 emissions using emission factors of 220 g/kWh for natural gas and 420 g/kWh for electricity. Economic efficiency was assessed by the simple payback period, with reference cost data drawn from the textbook [7]. Technical characteristics of the calcium silicate boards were obtained from the manufacturer's documentation [8].

Thermal analysis demonstrated that none of the building envelope elements of the existing building complies with the minimum requirements of DBN V.2.6-31:2021. For the uninsulated 680 mm brick wall R = 1.04 m²·K/W (standard 4.0), for the combined roof R = 1.13 (standard 7.0), for the ground floor R = 0.77 (standard 5.5), for windows R = 0.40 (standard 0.9), and for the entrance doors R = 0.43 (standard 0.7). The specific energy consumption EP_{use} = 84.3 kWh/m² exceeds the threshold value by a factor of 1.75, corresponding to class "G". The heat loss distribution through the envelope reveals that 71% is attributable to external walls, 12% to the combined roof, 9% to the ground floor, and 4% each to windows and doors, which determines the need for comprehensive thermal renovation of all envelope elements.

Given the heritage protection restrictions of zone G-2, a differentiated thermal renovation strategy was developed [9]. For the rear façade, which has no heritage restrictions, external ETICS with 150 mm mineral wool was applied, achieving R = 4.76 m²·K/W — the most efficient option in terms of the thermal-performance-to-cost ratio. For the main façade under heritage protection, the only permissible solution is internal insulation with 140 mm Multipor calcium silicate boards (λ = 0.042 W/(m·K), R = 4.04 m²·K/W). The fundamental advantage of the calcium silicate material lies in its capillary-active porous structure with high vapour permeability (μ = 2–3): condensate forming during the cold period at the insulation–masonry interface is transported by capillary action back into the indoor environment, where it safely evaporates. This ensures a safe moisture regime for the historic brick masonry, in contrast to vapour-tight polyisocyanurate boards, which create a critical risk of frost damage to the masonry]. An additional benefit of calcium silicate is its highest fire resistance class A1 (non-combustible), which is critical for educational facilities.

For the combined roof, additional mineral wool insulation of 150 mm (λ ≤ 0.037 W/(m·K)) was applied over the existing 200 mm layer, yielding a total insulation thickness of 350 mm and R = 7.35 m²·K/W. Hygrothermal modeling in CadeePro confirmed the absence of condensation within the redesigned assembly. For the ground floor, a layer of extruded polystyrene was proposed (R: 0.77 → 4.20); windows were upgraded from single glazing to energy-efficient double-glazed units with low-emissivity coating (R: 0.40 → 0.90); entrance doors were replaced with modern units of R = 0.70 m²·K/W. The lighting system was modernized by installing 300 LED luminaires of 16.5 W each, achieving a specific lighting power of 3.54 W/m². The complete set of thermal renovation measures is summarized in Table 1.

Table 1

Set of thermal renovation measures and their thermal performance.

Element	Measure	R before, m²·K/W	R after, m²·K/W
Walls (main façade)	Internal insulation with Multipor CS boards 140 mm	1.04	4.04
Walls (rear façade)	External ETICS with mineral wool 150 mm	1.04	4.76
Combined roof	Additional mineral wool overlay up to 350 mm	1.13	7.35
Ground floor	Extruded polystyrene layer	0.77	4.20
Windows	Replacement with energy-efficient double-glazed units	0.40	0.90
Entrance doors	Replacement with energy-efficient units	0.43	0.70

Implementation of the proposed complex raises the building's energy-efficiency class from "G" to "E" (EP_{use} reduced from 84.3 to 57.6 kWh/m²), accounting for the correction factor of 1.2 for renovation. All building envelope elements are brought into compliance with the regulatory thermal resistance values of DBN V.2.6-31:2021 for Climate Zone I. The total renovation cost (materials and installation) amounts to 1,300,000 UAH. The annual heating cost decreases from 25,207,650 to 22,443,200 UAH, yielding annual savings of 2,764,450 UAH and a simple payback period of 8 years, which represents a strong result for deep thermal renovation of heritage buildings. The total reduction of specific CO_2 emissions amounts to 39 kg/m², which is consistent with the EU strategy for building stock decarbonization by 2050 and with the requirements of the revised Directive EPBD 2024/1275establishing phased Minimum Energy Performance Standards for the existing non-residential building stock.

A thermal analysis of the public building constructed in 1895 at 2 A. Teslenka Street, Lviv, confirmed that none of the envelope elements complies with the requirements of DBN V.2.6-31:2021, with an initial energy-efficiency class of "G" and EP_{use} = 84.3 kWh/m². A comprehensive thermal renovation strategy with a differentiated approach was developed: internal insulation of the main façade with Multipor calcium silicate boards 140 mm; external ETICS with mineral wool 150 mm on the rear façade; mineral wool overlay up to 350 mm on the combined roof; extruded polystyrene on the ground floor; replacement of windows and entrance doors; and LED lighting. Implementation of the proposed complex raises the energy-efficiency class from "G" to "E", yields annual savings of 2.76 million UAH against a total investment

of 1.3 million UAH with a payback period of 8 years, and reduces specific CO_2 emissions by 39 kg/m² while fully preserving the authentic appearance of the heritage façades. The personal contribution of the authors lies in the justification of the 140 mm calcium silicate internal insulation system as the only solution simultaneously satisfying the criteria of heat and moisture transfer, moisture safety, and fire safety, as well as the requirements of DBN V.2.6-31:2021 and the heritage protection restrictions of zone G-2 in Lviv. The obtained results can be applied in the practice of deep thermal renovation of heritage buildings in other historic districts of Ukraine and Central Europe.

Conclusion. The implementation of a set of thermal modernization measures ensures an increase in the energy efficiency class of the building from "G" to "E", an annual reduction in heating costs by UAH 2,764,450 and a payback period of 8 years with a total cost of work of UAH 1.3 million. The reduction in specific CO_2 emissions by 39 kg/m² is consistent with the EU strategy for decarbonizing the building stock by 2050 and the requirements of Directive EPBD 2024/1275 while fully preserving the authentic appearance of the facades of the monument building.

References

1. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union. 2024;L 2024/1275.
2. State Building Codes of Ukraine DBN V.2.6-31:2021. Thermal insulation and energy efficiency of buildings. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine; 2021. 37 p. (in Ukrainian)
3. On Protection of Cultural Heritage: Law of Ukraine No. 1805-III of 08.06.2000. Available from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14
4. IEA SHC Task 59. Renovating Historic Buildings Towards Zero Energy. International Energy Agency; 2021. Available from: https://task59.iea-shc.org/
5. Künzel HM. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and Two-Dimensional Calculation Using Simple Parameters. Stuttgart: Fraunhofer IRB; 1995. 65p.
6. DEEP Team. DEEP Moisture Risk Report from Internal Wall Insulation. UK Government Publishing Service; 2024.
7. Sanytsky M., Marushchak U., Pozniak O. Energy-efficient technologies in construction: textbook: Lviv Polytechnic Publishing House; 2024. 160 p.
8. Ytong Multipor. Technical documentation for internal insulation. Xella International GmbH; 2022. 48 p
9. State Building Codes of Ukraine DBN B.2.2-12:2019. Planning and development of territories. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine; 2019. (in Ukrainian)

УДК 666.94:628.4:504.054

ВИРОБНИЦТВО НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ЦЕМЕНТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОГЕННИХ ВІДХОДІВ

Кузнєцов В. А.[1,a,*], **Мішук К. М.**[1,b]

[1] *Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна*

[a] *Студент 4 курсу;* [b] *Канд. техн. наук, доцент кафедри промислового та цивільного будівництва*

[*]*Автор для листування: kouznetsov595@gmail.com*

Анотація. *Під час проведення дослідження, було встановлено, що цементна промисловість є одним з найбільших джерел викидів CO_2, що обумовлює пошук шляхів для її екологізації та декарбонізації. Зокрема, у роботі було розглянуто та проаналізовано сучасні аспекти виробництва, так званих, низьковуглецевих цементів із використанням техногенних відходів. Було обґрунтовано доцільність використання відходів промисловості як вторинної сировини для виробництва екологічних альтернатив традиційному портландцементу та визначено перспективні напрямки впровадження й використання як власне таких цементів, так і будівельних матеріалів на їх основі.*

Ключові слова: *низьковуглецеві цементи, техногенні відходи, зола-винесення, доменний шлак, декарбонізація цементної промисловості.*

PRODUCTION OF LOW-CARBON CEMENT USING TECHNOGENIC WASTE

Kuznietsov V. A.[1,a,*], **Mishuk K. M.**[1,b]

[1] *Engineering Institute of Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine*

[a] *4th-year student, Ukraine;* [b] *PhD, Assoc. Prof. at the Dept. of Industrial and Civil Engineering*

[*] *Corresponding author: kouznetsov595@gmail.com*

Abstract. *During the research, it was found that the cement industry is one of the largest sources of CO2 emissions, which necessitates the search for ways to ecologize and decarbonize it. In particular, the paper considered and analyzed modern aspects of the production of so-called low-carbon cements using technogenic waste. The feasibility of using industrial waste as secondary raw materials for the production of environmentally friendly alternatives to traditional Portland cement was substantiated and promising directions for the introduction and use of both such cements themselves and building materials based on them were identified.*

Key words: *low-carbon cements, technogenic waste, fly ash, blast furnace slag, decarbonization of the cement industry.*

Вступ. Відповідно до проаналізованої інформації, було встановлено, що у 2022 році світове виробництво цементу виробило приблизно $1{,}6 \cdot 10^{12}$ кг CO_2, що становить близько 8% від загального обсягу викидів вуглекислого газу у світі [1]. Збільшення кількості парникових газів, зокрема вуглекислого газу, чинить негативний вплив як на екологічний стан довкілля, так і на клімат планети загалом. Тому, зважаючи на розвиток та впровадження аспектів «зелених» технологій і сталого розвитку, дослідження, що орієнтовані на декарбонізацію будівельної промисловості стають, станом на сьогодення, більш актуальними та важливими. З огляду цього, дослідження виробництва низьковуглецевих цементів за рахунок використання техногенних відходів, як екологічних альтернатив традиційному портландцементу дозволить скоротити викиди CO_2, зменшити навантаження на навколишнє середовище, за рахунок використання відходів та гармонізувати норми й стратегії ЄС у сфері «зелених» технологій.

Метою роботи є оглядове дослідження виробництва низьковуглецевих цементів з використанням техногенних відходів (впливу їх відповідних типів на властивості виготовлених цементів) та векторів застосування в будівельній індустрії низьковуглецевих цементів.

Матеріали та методи. Під час виконання дослідження було використано матеріали вітчизняного й іноземного походження та застосовано такі методи дослідження, як: емпіричні: опис (для характеристики впливу відходів на виробництво низьковуглецевих цементів); порівняння (для виокремлення спільних та відмінних рис у впливі відходів промисловості на властивості отриманих екологічних цементів) та комплексні: аналіз та синтез (для розгляду літератури та вибору необхідної інформації);

Результати та обговорення. Виробництво цементу – це складний енерго- та ресурсоємний процес, який вимагає близько 3,0-6,0 ГДж енергії на тонну та є досить залежним від невідновлюваних видів палива [1]. Наприклад, до вартості виробництва цементу входить використання приблизно: 40% енергії, 25% сировини, 25% витрат на перевезення та 25% витрат на технічне обслуговування, 10% витрат на оплату праці та 25% інших витрат (Рис. 1) [2].

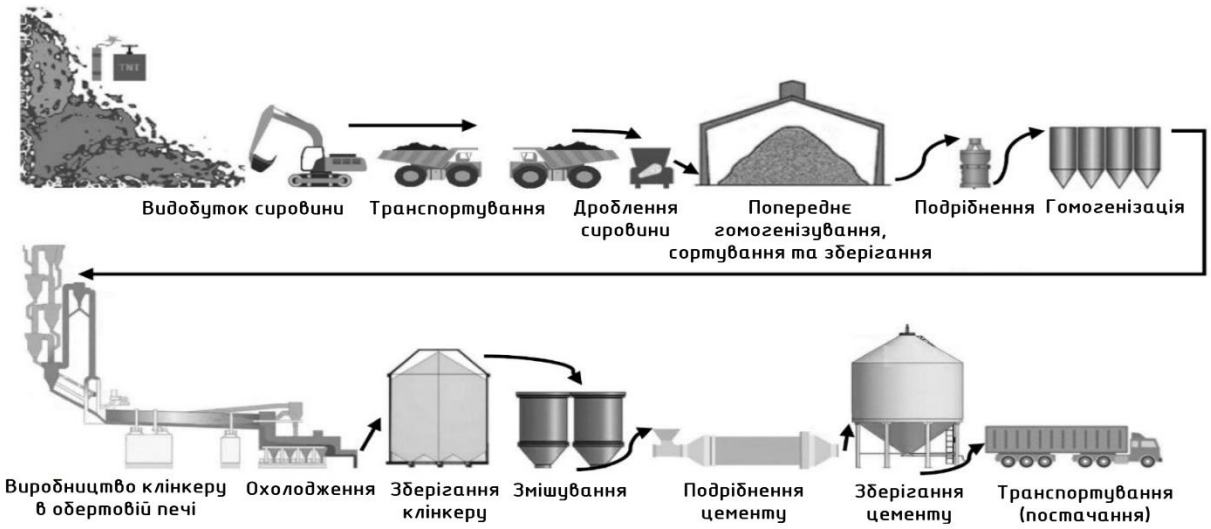


Рис. 1. Процес виробництва звичайного портландцементу

При цьому, цементна промисловість відповідальна за 8% від загального обсягу світових викидів вуглецю. Зокрема, під час виробництва цементу, кількість викидів вуглецю від процесу кальцинації вапняку для отримання клінкеру становлять близько 60%, кількість теплових викидів від спалювання викопного палива – 40%, кількість викидів від помелу цементу – 5% та кількість викидів від змішування та транспортування бетону – 5% [2] тощо, що певною мірою впливає на екологію довкілля (деградація ґрунтових прошарків, забруднення повітря, виснаження ресурсів [1]) і клімат планети загалом (формування парникового ефекту). Так, на Рисунку 2 представлено графік кількості викидів вуглекислого газу в період з 1960 року по 2022 рік [3].

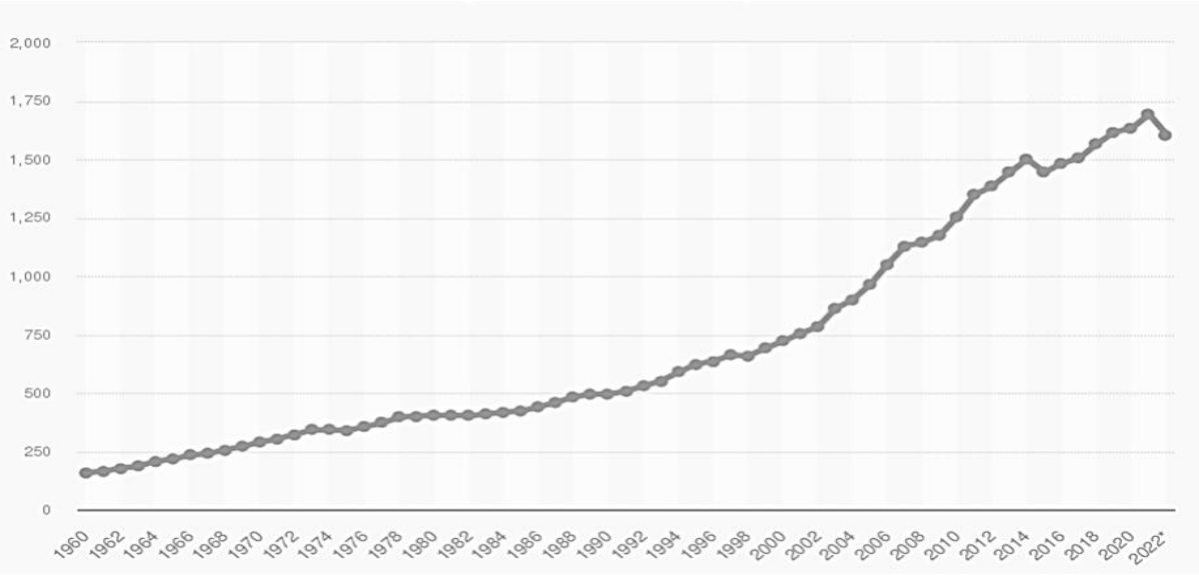


Рис. 2. Викиди CO_2 від виробництва цементу у світі (1960-2022 рр.), [$\times 10^9$ кг]

З огляду цього, зменшення кількості вуглецю, що викидається під час виробництва цементу, має вирішальне значення для досягнення відповідних екологічних та глобальних кліматичних цілей [3].

Ураховуючи, що цемент – це матеріал, який є ключовим для виготовлення бетону, світове виробництво якого, за прогнозами, зросте приблизно з 14 млрд м³, станом на сьогодні, до 20 млрд м³, до середини століття, оскільки процес урбанізації зростає, через що суттєво підвищується попит на інфраструктуру [3]. З метою декарбонізації цементної промисловості, одним з досить перспективних шляхів є виробництво, так званих, низьковуглецевих цементів з використанням техногенних відходів. У Таблиці 1 наведено коротку характеристику основних техногенних відходів, використання яких має місце під час виробництва екологічних альтернатив традиційних цементів [1].

Таблиця 1

Характеристика техногенних відходів для виробництва низьковуглецевих цементів

Техногенні відходи	**Кількість, [млн. т на рік]**	**Первинне джерело**	**Проблеми, які створюють відходи**
1	**2**	**3**	**4**
Хвости залізної руди	≈ 1400	Гірничодобувна промисловість (процес переробки бідних руд)	Ризик прориву хвостосховищ, забруднення довкілля, накопичення на звалищах
Зола-винесення	≈ 750	Теплові електростанції (ТЕС) (спалювання вугілля)	Утилізація на звалищах, забруднення довкілля (вимивання важких металів, зміна властивостей ґрунтів, вплив на повітря)
Золошлакові відходи	≈ 1934	Теплові електростанції (ТЕС) (спалювання вугілля)	Утилізація на звалищах, складність переробки, забруднення важкими металами
Мелений гранульований доменний шлак	≈ 300–360	Сталеливарна та чорна металургія	Накопичення на звалищах, складність утилізації та переробки, токсичність
Котельний шлак	–	Вугільні котли (спалювання твердого палива)	Утилізація на звалищах, забруднення важкими металами, запорошення повітря
Сталеплавильний шлак	≈ 200	Сталеливні заводи (переробка чавуну та металобрухту на сталь)	Вилуговування важких металів, скидання на звалища, токсичність
Мідні шлаки	–	Виплавка міді (пірометалургійна переробка мідних руд)	Вилуговування важких металів, висока вартість утилізації, накопичення на звалищах

Таблиця 1, продовження

1	2	3	4
Червоний шлам	≈ 170	Виробництво глинозему з бокситів	Утилізація на звалищах, висока лужність, забруднення довкілля
Кальцинована глина (каолін)	–	Видобуток і збагачення інших копалин	Енергоємна переробка, запилення повітря, накопичення відходів
Метакаолін	–	Термічна обробка каолінової глини	Накопичення відходів, запилення повітря, складність утилізації
Керамічні пилові відходи	–	Виробництво керамічних виробів та матеріалів	Утилізація на звалищах, забруднення довкілля (пил, кислотність)
Аспіраційний (гранітний) пил	–	Промислові зони переробки каменю, щебеню, граніту	Складність управління дрібними частинками, накопичення відходів
Будівельні відходи	–	Будівельні, ремонтні та демонтажні роботи	Обмежена переробка, накопичення відходів, наявність потенційно небезпечних сполук

Дані, наведені в Таблиці 1, свідчать про те, що кількість утворених техногенних відходів є досить значною, що обумовлює потребу не лише в їх утилізації або захороненні, оскільки відповідні полігони займають значні площі територій, а в створенні можливостей для їх переробки (за можливості) та використанні як вторинної сировини.

На прикладі деяких відходів, зазначених в Таблиці 1, можна простежити їх вплив на виробництво та властивості низьковуглецевих цементів:

1. Відходи на основі золи. Згідно ДСТУ Б В.2.7-46:2010, золу-винесення отримують електростатичним або механічним осадженням пилоподібних частинок із димових газів теплових агрегатів, в яких спалюють тонкоподріднене вугілля (при цьому зола-винесення повинна відповідати вимогам ДСТУ Б.В.2.7-128) [4]. Використання золи-винесення певною мірою впливає на властивості цементу, зокрема: додавання 15–30% золи-винесення до структури цементу, збільшує його довготривалу міцність на стиск (28–90 днів) лише з незначним зниженням ранньої міцності; висока дисперсність та склоподібна структура золи-винесення забезпечують її ефективну участь у пуцоланових реакціях, що призводить до ущільнення мікроструктури, утвореного цементного каменю; зола-винесення дозволяє зменшити капілярну пористість та підвищити стійкість до проникнення агресивних сполук (хлоридів та сульфатів); включення золи-винесення під час виробництва цементу зменшує загальне виділення тепла під час гідратації, що зменшує ймовірність появи термічних тріщин та усадочних

деформацій на ранніх стадіях твердіння матеріалів на основі бетону; додавання золи-винесення покращує дисперсію системи, сприяє однорідності суміші та стимулює пуцоланову реакцію [5].

2. Відходи на основі меленого гранульованого доменного шлаку. Згідно ДСТУ Б В.2.7-46:2010, мелений гранульований доменний шлак отримують швидким охолодженням алюмосилікатного розплаву, що утворюється при плавленні залізної руди в доменній печі, містить не менше половини за масою склоподібної фази та має гідравлічну активність [4]. Застосування меленого гранульованого доменного шлаку значно впливає на виробництво цементу, зокрема: при додаванні до структури цементів доменного шлаку, він виявляв низьку гідравлічну активність через нижчий вміст склоподібної фази; додавання доменного шлаку збільшувало час тужавлення цементу; цементні пасти, що містили доменний шлак демонстрували набагато більшу границю текучості, ніж ті, які мали у своєму складі мідний шлак за тієї кількості [6].
3. Відходи на основі мідного шлаку. Використання мідних шлаків теж значною мірою впливає на виробництво цементів, зокрема: при додаванні до структури цементу мідного шлаку, він виявляв високу пуцоланову активність через високий ступінь його склування; при збільшенні вмісту мідних шлаків, фіксувалися поступове зниження загальної теплоти гідратації, що виділяється протягом перших двох днів та підвищення гідратаційної активності у цементах на пізніших стадіях (2-28 днів), що було результатом його сильної пуцоланової реакційної здатності; цементи з додаванням мідного шлаку показали дещо меншу потребу у воді, у порівнянні з цементами на основі доменного шлаку; додавання мідного шлаку до цементу обумовлювало більшу плинність пасти, що пояснювалося меншою кількістю фракції дрібних частинок; цементні суміші, що містили 20% та 40% мідного шлаку, досягли значень міцності, що перевищували показники еталонної суміші на 4% (через 90 діб), при цьому при вмісті 60% мідного шлаку міцність знижувалася на 5% [6].
4. Відходи на основі червоного шламу. Червоний шлам – це побічний продукт, який отримують під час виробництва глинозему з бокситової руди, яку промивають, подрібнюють і обробляють розчином гідроксиду під високим тиском і температурою. Додавання червоного шламу у процесі виробництва цементів характеризувалося таким впливом, зокрема: зі збільшенням вмісту червоного шламу зменшувалася міцність бетону на стиск та розтяг, з огляду цього, більш оптимальний відсоток заміни цементу за вагою становив 25%,

завдяки чому результати заміни майже були співставлені з результатами контрольованого бетону; збільшення вмісту червоного шламу, модифікуючи склад цементів, значно вплинуло на оброблюваність бетону, однак її можна поліпшити, додавши необхідну кількість суперпластифікаторів; збільшення вмісту червоного шламу призводить до зменшення кількості цементу, що, у свою чергу, призводить до підвищення легкоукладальності утвореного бетону [7].

5. Система LC^3 (Limestone Calcined Clay Cement). Це технологія, яка використовує цемент з кальцинованою глиною. Загалом, відбувається заміщення 50-65% клінкеру глиною разом із додаванням 15-20% вапняку. Використання цієї технології дає змогу: скоротити викиди CO_2 на 20-40% та зменшити енергоспоживання; досягти цементам міцності 80-90% від звичайного вже на 28-й день, а до 90-го – повністю відповідають або навіть перевищують його показники [8]; підвищити стійкість до хлоридів, сульфатів та лужно-кремнеземистих реакцій; забезпечити хорошу механічну міцність, подібну або кращу, ніж у традиційного портландцементу [9]; скоротити споживання електроенергії порівняно з виробництвом звичайного портландцементу [10]. Наприклад, бетон виготовлений з використання LC^3 мав вищу міцність на стиск порівняно з бетоном з однаковими пропорціями комбінованих матеріалів у будь-якому віці до 1 року; конструкції, побудовані з бетону, що містить LC^3, мали значно довший термін служби порівняно з тими, що використовують звичайний портландцемент; інженерні цементні композити (ECC) виготовлені з використанням LC^3 мали виняткову пластичність на розтяг та властивості зміцнення при деформації [10].
6. Будівельні відходи. Руйнування та знесення будівельних об’єктів, проведення робіт з реконструкції, ремонту чи нового будівництва формує значне скупчення будівельних відходів, до складу яких входять кальцій, кремній, алюміній, залізо, магній, калій, титан, сірку та інші [10], що обумовлює їх застосування як вторинної сировини для виробництва низьковуглецевих цементів. Наприклад, при використанні 30% гідратованих цементних відходів (шматки бетону, бетонний пил), що складаються з аморфного силікату кальцію, гідратів алюмінату кальцію, гідроксиду кальцію та невеликої кількості карбонату кальцію/магнію можна виготовити клінкер з еквівалентним мінералогічним складом, який виділяє приблизно на третину менше CO_2 під час процесу горіння, порівняно з традиційним процесом. Використання азбестоцементних відходів сприяло

прискоренню реакцій в процесі утворення клінкеру та збільшенню частки аліту (C3S). Інтеграція азбестоцементних відходів забезпечила зменшення використання приблизно 73,7% вапняку та 86,8% глини. Використання до 74% азбестоцементних відходів у виробництві низьковуглецевих цементу дозволило зменшити викиди CO_2 до 13,68% та скоротити споживання енергії на 10,13%. Інтеграція будівельних відходів таких як залишки кераміки, бетону цегли тощо, сприяла зменшенню використання приблизно 8% вапняку в сировинній суміші, скороченню викидів CO_2 до 8,1% на тонну виробленого клінкеру [10].

Відповідно до цього, варто зазначити, що використання техногенних відходів, хоч і потребує додаткових досліджень та розвитку відповідних норм регулювання, однак має місце у виробництві низьковуглецевих цементів.

При цьому, варто також зазначити, що низьковуглецевий тип цементів може мати місце у використанні під час монолітного та збірного будівництва (житлові, громадські та промислові об’єкти), зокрема, за рахунок виготовлення геополімерних бетонів та матеріалів з вмістом екологічного цементного в’яжучого, дорожнього будівництва, зокрема, за рахунок стійкості низьковуглецевих цементів до впливу агресивних сполук, реконструкції та відновлення цілісності будівельних об’єктів, зокрема, за рахунок досить швидкого набору міцності та скороченні витрат при виробництві екологічних цементних в’яжучих, розробки нових будівельних матеріалів з низьким вуглецевим слідом та розвитку «зеленого» й енергоефективного будівництва. Наприклад, низьковуглецевий цемент ECOPlanet від Holcim, який виготовляється з використанням кальцинованої глини та перероблених будівельних матеріалів, дає змогу скорочувати викиди CO_2 до 50% [11].

Висновок. На основі отриманих даних було встановлено, що цементна промисловість чинить негативний вплив на екологічний стан довкілля та клімат планети загалом, що обумовлює актуальність пошуків способів для декарбонізації цього сектору. У роботі було охарактеризовано основні типи техногенних відходів, використання яких має місце у виробництві низьковуглецевих цементів та на прикладі деяких з них було висвітлено вплив цих відходів на виробництво та властивості утворених цементів, особливо з точки зору зменшення вуглецевого сліду та навантаження на навколишнє довкілля. Загалом, використання техногенних відходів – це досить перспективний напрям, розвиток і дослідження якого дасть змогу скоротити використання невідновлюваних ресурсів, знизити навантаження на довкілля, зменшити кількість викидів вуглекислого газу та сприятиме розвитку «зеленого»

та сталого будівництва й матеріалознавства, однак, станом на сьогодення, все ще потребує додаткових досліджень (на більш масштабних проєктах) та розвитку й впровадження відповідних норм і вимог тощо.

Література

1. Akintayo B.D. et al. Transforming Industrial Waste into Low-Carbon Cement: A Multi-Criteria Assessment of Supplementary Cementitious Materials for Sustainable Concrete Design. *Recycling*. 2025;10(6),211. URL: https://doi.org/10.3390/recycling10060211 (дата звернення: 28.03.2026)
2. Global Cement Industry. *Gabelli* : website. URL: https://gabelli.com/research/global-cement-industry/ (дата звернення: 28.03.2026)
3. 4 ways to make the cement industry more sustainable. *World Economic Forum* : website. URL: https://www.weforum.org/stories/2024/09/cement-production-sustainable-concrete-co2-emissions/ (дата звернення: 28.03.2026)
4. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. [На заміну ДСТУ Б В.2.7-46-96; чинний 2011-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2011. 14 с. URL: https://bud-kiev.com.ua/wp-content/uploads/2019/02/27-46-2010.pdf (дата звернення: 28.03.2026)
5. Rakhimova G. et al. Obtaining of Composite Cements with Addition of Fly Ash. *Buildings*. 2025;15(19),3523. URL: https://doi.org/10.3390/buildings15193523 (дата звернення: 28.03.2026)
6. Grzeszczyk S. et al. Activity of Copper and Blast Furnace Slag and Its Influence on the Properties of Cement. *Materials*. 2026;19(1),38. URL: https://doi.org/10.3390/ma19010038 (дата звернення: 28.03.2026)
7. Vaibhav S. et Rakesh P. Utilization of red mud in cementitious concrete - a review. *International journal of advanced research in engineering & technology*. 2020;11(2),426-430. DOI:10.17605/OSF.IO/HGN3W (дата звернення: 28.03.2026)
8. Галушка С.А. Бетони з низьковуглецевим в'яжучим як елемент сталого будівництва. *The 13th International scientific and practical conference «Scientific research: modern challenges and future prospects» (August 4-6, 2025), Munich, Germany.* 2025;92-98. https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2025/08/SCIENTIFIC-RESEARCH-MODERN-CHALLENGES-AND-FUTURE-PROSPECTS-4-6.08.25.pdf (дата звернення: 28.03.2026)
9. Hosen K., Chen B. Limestone Calcined Clay Cement (LC3): A Review of Materials, Properties, Production and Environmental Impact. *Journal of Building Engineering*. 2025; 113672. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113672 (дата звернення: 28.03.2026)
10. Kaptan K., Cunha S., Aguiar J. A Review: Construction and Demolition Waste as a Novel Source for CO2 Reduction in Portland Cement Production for Concrete. *Sustainability*. 2024;16(2),585. URL: https://doi.org/10.3390/su16020585 (дата звернення: 28.03.2026)
11. ECOPlanet. *Sustainable Construction & Building Company | Holcim* : website. URL: https://www.holcim.com/what-we-do/our-building-solutions/cement/ecoplanet (last access: 28.03.2026)

References

1. Akintayo B.D. et al. Transforming Industrial Waste into Low-Carbon Cement: A Multi-Criteria Assessment of Supplementary Cementitious Materials for Sustainable Concrete Design. *Recycling*. 2025;10(6),211. URL: https://doi.org/10.3390/recycling10060211 (last access: 28.03.2026)
2. Global Cement Industry. *Gabelli* : website. URL: https://gabelli.com/research/global-cement-industry/ (last access: 28.03.2026)
3. 4 ways to make the cement industry more sustainable. *World Economic Forum* : website. URL: https://www.weforum.org/stories/2024/09/cement-production-sustainable-concrete-co2-emissions/ (last access: 28.03.2026)
4. National Standard of Ukraine DSTU B V.2.7-46:2010. Budivelni materialy. Tsementy zahalnobudivelnoho pryznachennia. Tekhnichni umovy. [DSTU B V.2.7-46:2010. Building materials. Cements for general construction purposes. Technical conditions]. Kyiv, 2011. 14 p. (URL: https://bud-kiev.com.ua/wp-content/uploads/2019/02/27-46-2010.pdf (last access: 28.03.2026, in Ukrainian).
5. Rakhimova G. et al. Obtaining of Composite Cements with Addition of Fly Ash. *Buildings*. 2025;15(19),3523. URL: https://doi.org/10.3390/buildings15193523 (last access: 28.03.2026)
6. Grzeszczyk S. et al. Activity of Copper and Blast Furnace Slag and Its Influence on the Properties of Cement. *Materials*. 2026;19(1),38. URL: https://doi.org/10.3390/ma19010038 (last access: 28.03.2026)
7. Vaibhav S. et Rakesh P. Utilization of red mud in cementitious concrete - a review. *International journal of advanced research in engineering & technology*. 2020;11(2),426-430. DOI:10.17605/OSF.IO/HGN3W (last access: 28.03.2026)
8. Halushka S.A. Betony z nyzkovuhletsevym viazhuchym yak element staloho budivnytstva. [Concretes with low-carbon binder as an element of sustainable construction] *The 13th International scientific and practical conference «Scientific research: modern challenges and future prospects» (August 4-6, 2025), Munich, Germany.* 2025;92-98. https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2025/08/SCIENTIFIC-RESEARCH-MODERN-CHALLENGES-AND-FUTURE-PROSPECTS-4-6.08.25.pdf (last access: 28.03.2026, in Ukrainian)
9. Hosen K., Chen B. Limestone Calcined Clay Cement (LC3): A Review of Materials, Properties, Production and Environmental Impact. *Journal of Building Engineering*. 2025; 113672. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113672 (last access: 28.03.2026)
10. Kaptan K., Cunha S., Aguiar J. A Review: Construction and Demolition Waste as a Novel Source for CO2 Reduction in Portland Cement Production for Concrete. *Sustainability.* 2024;16(2),585. URL: https://doi.org/10.3390/su16020585 (last access: 28.03.2026)
11. ECOPlanet. *Sustainable Construction & Building Company | Holcim* : website. URL: https://www.holcim.com/what-we-do/our-building-solutions/cement/ecoplanet (last access: 28.03.2026)

УДК 624.21

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРОІЗОЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ МЕТИЛМЕТАКРИЛАТНОЇ СМОЛИ ДЛЯ ЗАХИСТУ БЕТОННИХ ТА МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Ходюк О. В. [1,a], **Гаркуша М. В.** [1,b,*]

[1] *Національний транспортний університет, Київ, Україна*

[a] *Студент 4 курсу;* [b] *Канд. техн. наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд*

[*] *Автор для листування: mykola.harkusha@ntu.edu.ua*

Анотація. *Узагальнено існуючи підходи застосування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних спорудах та розроблення рекомендацій щодо улаштування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли. Для досягнення поставленої мети, проведено роботу, яка складається з аналізу існуючого досвіду застосування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли, узагальнення експериментальних досліджень, що дало змогу розробити вимоги до фізико-механічних характеристик складових гідроізоляційної системи, надання рекомендацій, щодо підготовки поверхні під гідроізоляційну систему, розробка підходів з улаштування гідроізоляційної системи. На основі проведених досліджень узагальнено існуючі підходи застосування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних спорудах та розроблено рекомендацій щодо улаштування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли*.

Ключові слова: *гідроізоляційна система, гідроізоляційна мембрана, ґрунтовки, зчіпний шар, метилметакрилатна смола, транспортна споруда*.

MODERN APPROACHES TO THE APPLICATION OF WATERPROOFING SYSTEMS BASED ON METHYL METHACRYLATE RESIN FOR THE PROTECTION OF CONCRETE AND METAL STRUCTURES

Khodiuk O. V. [1,a], **Harkusha M. V.** [1,b,*]

[1] *National Transport University, Kyiv, Ukraine*

[a] *4th-year student;* [b] *PhD, Assoc. Prof. at the Dept. of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures*

[*] *Corresponding author: mykola.harkusha@ntu.edu.ua*

Abstract. *Summarize existing approaches to the use of waterproofing systems based on methyl methacrylate resin on transport structures and develop recommendations for the installation of waterproofing systems based on methyl methacrylate resin. To achieve the goal, the work was carried out, which consists of the analysis of the existing experience in the use of waterproofing systems based on methyl methacrylate resin, the generalization of experimental studies, which made it possible to*

develop requirements for the physical and mechanical characteristics of the components of the waterproofing system, the provision of recommendations for the preparation the surface for the waterproofing system, development of approaches to the arrangement of the waterproofing system. Based on the conducted studies, the existing approaches to the application of waterproofing systems based on methyl methacrylate resin on transport structures were summarized and recommendations were developed for the installation of waterproofing systems based on methyl methacrylate resin.

Keywords: *waterproofing system, waterproofing membrane, primers, adhesion layer, methyl methacrylate resin, transport structure*.

Актуальність дослідження. Гідроізоляційна система, що застосовується для захисту бетонних та металевих конструкцій транспортного та гідротехнічного будівництва повинна мати надійність, що представлено у виконанні необхідних функцій в умовах експлуатації протягом заданого часу при збереженні основних характеристик, мати максимально близький до конструкцій, що ізолюються, термін служби.

Найбільш досконалими з точки зору забезпечення захисту плити є рідкі композитні мембрани на основі поліуретанових і метилметакрилатних смол. Мембранні покриття утворюють суцільну безшовну конструкцію на поверхнях складної форми, так як їх нанесення проводиться методом розпилення рідини.

Дослідження впливу різних факторів на довговічність гідроізоляційних мембран на основі метилметакрилатної є необхідною складовою для розроблення технології влаштування гідроізоляційних мембран на основі метилметакрилатної смоли на транспортних та гідротехнічних спорудах та встановлення вимог до них.

Тому, проведення досліджень щодо застосування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли для захисту бетонних та металевих конструкцій є актуальним та необхідним.

Стан проблеми. У 1920-х роках в Європі та США, почали використовувати відносно примітивні гідроізоляції на бетонних спорудах транспортного та гідротехнічного будівництва, в тому числі і мостів. З 1940-х років до 1950-х років, з розгортанням масштабного будівництва автомобільних доріг розпочалося масове застосування різноманітних гідроізоляційних систем, однак виявилося, що застосування ефективних гідроізоляційних систем досить складна справа. У 1960-х роках внаслідок накопичення знань, а також роботи мостового покриву в агресивних середовищах, здебільшого від дії солей, з'явилася концепція водонепроникної системи, з'являються методики дослідження гідроізоляції [1].

Системи гідроізоляції мостів на основі рідкого полімеру (німецька мова — Flüssigkunststoff (FLK)) були впроваджені приблизно одночасно із системами

гідроізоляції мостів з використанням полімерно-бітумних гідроізоляційних мембран [2].

Віадук Грюєр (Viaduc de la Gruyère) був побудований між 1974 і 1979 роками [3]. Його гідроізоляція була виконана за допомогою рідкого полімеру Efkaprene S3. Полімерно-бітумні гідроізоляційні мембрани вперше були широко використані в 1978 році на віадуку Беккенрід-Ленен (Lehnenviadukt Beckenried) [4].

В 1976 році в США в Національній програмі спільних досліджень автомобільних доріг (NCHRP) запропоновано випробування ефективності гідроізоляційного матеріалу [5].

Хоча полімерно-бітумні гідроізоляційні мембрани згодом розширилися та зберегли свої позиції як системи гідроізоляції для мостів (бетонних та металевих елементів), рідко-ін'єкційні полімерні гідроізоляційні системи з того часу стали нішевим рішенням, тимчасово займаючи значну частку ринку.

Спочатку системи на основі розчинених полімерів (Efkaprene S3) були в центрі уваги у Швейцарії, а також у Німеччині. Рідкі полімери на основі реактивних речовин були розроблені та використані з початку 1980-х років [2]. Цей розвиток частково був пов'язаний з не зовсім позитивним досвідом використання систем на основі розчинених полімерів (наприклад, утворення бульбашок на покритті віадука Грюєр), а частково з досягненнями в хімії поліуретанів, які дозволили розробити «оригінальний» тип поверхневої гідроізоляції. Після розробок 1980-х років було опубліковано та переглянуто в 1995 році ZTV-BEL-B Частина 3/87 [6], перший звід правил у німецькомовних країнах щодо гідроізоляції мостів з рідких полімерів, ZTV-BEL-B Частина 3/95 [7].

Частка ринку гідроізоляції мостів з рідких полімерів у Швейцарії сьогодні переважно становить до 5 %. У Німеччині, де з точки зору Швейцарії очікувалася відносно висока частка ринку, зараз вона становить лише 1 %.

Таким чином, можна зробити висновок, що, незважаючи на значний інтерес, виявлений адміністративними органами та будівельними органами, гідроізоляція мостів та гідротехнічних споруд, що наноситься рідким способом, не мала значного успіху. Окрім частково негативного досвіду використання рідкої гідроізоляції, це також було пов'язано з вищими виробничими витратами на рідку гідроізоляцію порівняно з полімерно-бітумними гідроізоляційними мембранами.

У Великій Британії рідка гідроізоляція також була розроблена та впроваджена як система гідроізоляції мостів у середині 1970-х років після

досліджень щодо придатності систем гідроізоляції мостів, що використовувалися на той час. Однак виробники застосували інший хімічний підхід та розробили рідку гідроізоляцію на основі ПММА (поліметилметакрилату). У Великій Британії, на відміну від материкової Європи, цей початок призвів до домінуючої частки ринку рідких гідроізоляційних систем [2].

1 січня 2005 року набрав чинності стандарт SN 640 450: 2005 «Гідроізоляційні системи та бітумні шари на бетонних мостах» [8]. Цей стандарт дозволяє два еквівалентні типи гідроізоляційних систем: гідроізоляційні системи з гідроізоляційним шаром з полімерно-бітумних герметичних мембран та гідроізоляційні системи з гідроізоляційним шаром з рідкого пластику. Це було продовжено в SN 640 450a: 2009, який набрав чинності 1 січня 2009 року [9].

На відміну від стандарту, Федеральне дорожнє управління Швейцарії (Bundesamt für Strassen ASTRA) не дозволило використання гідроізоляційних систем FLK у своїх правилах «Керівні принципи щодо конструктивних деталей мостів, розділ 5: Гідроізоляція та дорожні покриття» (з переглядом 2005 року) [10].

У своїх правилах ASTRA зазначає: «Використання гідроізоляційних систем FLK на всю поверхню ставить дуже високі вимоги до матеріалу та застосування». Наразі ущільнювачі FLK використовувати не можна. Після ратифікації Керівних принципів EOTA, ASTRA буде прийняте рішення щодо використання гідроізоляції FLK.

Розділ 5 з того часу не переглядався, і навіть після введення Керівних принципів EOTA, ASTRA продовжує загалом не дозволяти FLK як гідроізоляцію для мостів.

Розробка Посібника EOTA розпочалася у грудні 2000 року, а Посібник набув чинності у липні 2010 року як ETAG 033 [11]. Властивості, необхідні в ETAG 033, були обрані на основі національних потреб, а також технічних вимог, щоб мінімізувати вразливість до ризику гідроізоляційних систем FLK та передбачити термін служби щонайменше 25 років.

З введенням ETAG 033 технічне схвалення гідроізоляційних систем FLK для мостів регулюється однаково по всій Європі. Технічне схвалення, надане однією країною, також дійсне в усіх інших країнах. Однак, чи можна його застосовувати, залежить від того, чи відповідає продукт також національно визначеним вимогам для відповідного об'єкта. У Швейцарії SN 640 450 «Гідроізоляційні системи та бітумні шари на бетонних мостах» було переглянуто та адаптовано до властивостей, визначених ETAG 033 щодо рідких гідроізоляційних систем.

Таким чином, чинний стандарт SN 640 450a: 2009 забезпечує поточну основу для використання рідких гідроізоляційних систем на мостах та гідротехнічних спорудах транспортного будівництва.

Протягом кількох років рідкі гідроізоляційні системи у Швейцарії все частіше базуються на полімерах PMMA (поліметилметакрилат) та PUA (полісечовина) замість PU (поліуретан). Як і у випадку з PU, для PMMA та PUA мало даних щодо взаємозв'язку між адгезійними властивостями та погодними умовами під час використання рідких гідроізоляційних систем та в часовому інтервалі між рідкими гідроізоляційними системами та укладанням мастикового асфальтобетону [2].

На сьогоднішній день, гідроізоляційні системи на основі метилметакрилатної смоли широко застосовуються на транспортних та гідротехнічних спорудах в Україні та світі [12].

Мета роботи. Встановити сучасні підходи застосування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли для захисту бетонних та металевих конструкцій транспортних та гідротехнічних споруд.

Отримані результати. Гідроізоляційна система складається, як правило, з трьох шарів – ґрунтовки, гідроізоляційної мембрани, зчіпного шару.

Підготовка поверхні транспортних споруд для улаштування гідроізоляційної системи, поверхня повинна бути сухою, не містити мастильних матеріалів, жиру, частинок, які відшаровуються, цементного молока, пухких матеріалів, бруду, не мати ознак вторинної корозії.

Усі напливи цементобетону, неправильні опалубні стики, гострі опуклі та увігнуті кути повинні бути зашліфовані, вирівняні або зашпакльовані. Усі порожнисті раковини та порожнечі мають бути заповнені.

Репрофілювання улаштуванням цементобетону або цементного розчину, як правило, рекомендується у випадках, коли не дотримані потрібні показники рівності поверхні цементобетонної основи. Ремонтування також є необхідним тоді, коли на великій площі поверхні перевищені граничні відхилення висоти нерівностей.

З моменту влаштування нової цементобетонної основи має пройти не менше ніж 14 діб. Вона повинна мати 100 % проєктної міцності, для нанесення гідроізоляції.

У разі застосування будь-яких добавок до цементу або прискорювачів схоплювання цементобетону, потрібно уточнити можливість їх застосування з точки зору сумісності з гідроізоляцією.

Пошкоджені ділянки цементобетону можна відремонтувати, використовуючи розчин для швидкого ремонтування. Якщо для ремонтування цементобетону будуть використовуватися інші матеріали, їх сумісність треба попередньо перевірити, ремонтна суміш повинна бути не нижче ніж R4.

Під час очищення поверхні треба контролювати температуру, вологість та точку роси перед початком кожної зміни та двічі на зміну. Температура навколишнього середовища контролюється на відстані не більше ніж 2 м від поверхні, що очищається. Температура сталевої поверхні, за якою можуть виконуватися абразивоструминні роботи, повинна бути на 3 °С вище за точку роси.

Шорсткість поверхні повинна задовольняти вимоги таблиці 1. Сумарна площа окремих заглиблень і раковин на 1,0 м^2 на відстані між виступами та западинами від 1,2 мм до 2,5 мм та глибиною до 3,0 мм – не більше ніж 0,2 % площі. Оцінювання шорсткості провадиться візуально.

Роботи з влаштування гідроізоляції розпочинають після одержання висновка генпідрядника на відповідність поверхні транспортної споруди вимогам відповідних стандартів.

До початку виконання робіт рекомендується виконати підтвердження сумісності обраних технологічних процесів на тестових поверхнях в репрезентативних ділянках.

Таблиця 1

Вимоги стосовно шорсткості цементобетонної основи і необхідні заходи

Система	Висота нерівності R_t, мм	Необхідні заходи
Гідроізоляція	< 0,5	Підвищити шорсткість
	від 0,5 до 1,2	Жодних заходів
	> 1,2	Вирівнювання нерівності, надання шорсткості

Перед тим, як почати нанесення гідроізоляції, підрядник повинен перевірити адгезію гідроізоляції з основою вибірковим нанесенням невеликих ділянок даної гідроізоляції, включаючи нанесення ґрунтовки, що дозволяє встановити адгезійну міцність на відрив. Треба виконати щонайменше п'ять випробувань на кожні 500 м^2. На менших за площею мостах треба отримати не менше шести результатів випробувань.

Необхідно визначати час висихання рідких гідроізоляцій та їх міцність зчеплення під час розтягу на відрив на поверхні основи визначають.

На цементобетонних та металевих основах на яких буде здійснюватися автомобільний рух, рекомендовано, щоб мінімальна міцність на відрив складала не менше ніж 2,1 МПа.

На цементобетонних та металевих основах на яких буде здійснюватися пішохідний рух, рекомендовано, щоб міцність на відрив складала не менше ніж 1,5 МПа.

Усі результати треба відображати в журналі обліку матеріалів і контролю якості. Також треба зареєструвати характер пошкодження.

Безпосередньо перед влаштуванням гідроізоляції треба убезпечитись візуально, потім інструментально, що цементобетон сухий. Для того щоб уникнути утворення пухирів під час влаштування гідроізоляції цементобетонна основа повинна бути якомога щільнішою.

Контроль цементобетонної основи, як правило, повинен проводитись після завершення підготовки поверхні і перед самим початком гідроізоляційних робіт. Усі випробування повинні бути задокументовані у звіті.

Характеристики поверхні цементобетонної основи повинні відповідати наступним вимогам:

– шліфовані, без випуклостей, гострих граней і шорсткості/нерівності;

– відсутність слідів жирів і плівок від обробки, поверхневих домішок і цементного молочка;

– відсутність нерівної і пористої поверхні, лунок;

– відсутність щебню, пор і бульбашок повітря;

– відсутність слідів оливи, олій, жирів, тощо;

– відсутність води, пилу і вільних часточок;

– відсутність металевих, дерев’яних і пластикових елементів.

Для несприятливих умов експлуатування, коли покрив сприймає значні осьові навантаги, хімічні впливи і/або різкі коливання температури, цементобетонний покрив після підготовки повинні відповідати наступним вимогам:

– поверхнева міцність на відрив – не менше ніж 2,1 МПа;

– профіль поверхні, визначений порівнянням з профілем наждачного паперу заданої зернистості – грубий наждачний папір (не менше ніж Р-40);

– оцінювання абсорбції цементобетону краплями води (оцінювання вмісту залишкових гідрофобних забруднень) – кут змочування (крайовий кут) краплі води повинен бути рівним 0° (вода розтікається по поверхні).

Додаткові вимоги до металевої основи включають заборону проводити роботи на вологих поверхнях та під час випадання опадів (дощ, сніг) або ймовірності їх випадання до стадії затвердіння покриття на відлип.

Гідроізоляцію влаштовують за технологією у вигляді системи, що складається з трьох міцно пов'язаних між собою хімічно однорідних шарів:

– нижній шар – ґрунтовка (праймер), товщина сухої плівки 0,30…0,75 мм – антикорозійне полімерне покриття з високою адгезією до поверхні цементобетону чи металу та до проміжного шару, забезпечує для цементобетонних поверхонь закриття пор, зміцнення поверхневого шару цементобетону, адгезію матеріалу до основи, знепилювання, а для металевих поверхонь – антикорозійний захист металевої поверхні від окислення після абразивоструминного очищення та адгезію гідроізоляційного матеріалу до основи. Ґрунтовка може містити зчіпний шар з мінерального матеріалу;

– проміжний шар – гідроізоляційна мембрана – одно або багато шарове, високоеластичне водонепроникне безшовне покриття, товщина сухої плівки 2,0…3,0 мм, яка забезпечує водонепроникність по всій поверхні, що гідроізолюється;

– поверхневий зчіпний шар – зносостійкий, тріщиностійкий, хімічно та атмосферостійкий, у тому числі до дії ультрафіолетових променів, покрив, що забезпечує адгезію матеріалу гідроізоляційної мембрани з ущільненим або литим асфальтобетоном проїзної частини транспортної споруди.

До початку нанесення гідроізоляційної системи виконують такі заходи:

– на ділянці виконання робіт завершують загальнобудівельні роботи;

– забезпечують об'єкт усіма необхідними гідроізоляційними матеріалами;

– перевіряють відповідність похилів поверхні, на яку гідроізоляція наноситься, проєктним величинам;

– перевіряють надійність системи водовідведення;

– забезпечують сухість поверхні, на яку гідроізоляція наноситься;

– готують до роботи установку безповітряного розпилення;

– проводять інструктаж на робочому місці;

– запобігають пересуванню працівників та механізмів по нанесених шарах гідроізоляції.

Під час нанесення гідроізоляційної системи температура робочих поверхонь, навколишнього середовища та матеріалів, що наносяться, повинна відповідати вимогам технічної документації на конкретний матеріал.

Роботи з гідроізоляції виконуються у такій послідовності:

– підготовка поверхні під гідроізоляційну систему;

– нанесення захисної ґрунтовки (з можливим розсипом кварцового піску);

– нанесення гідроізоляційної мембрани;

– нанесення поверхневого захисного зчіпного шару (з можливим розсипом кварцового піску або нанесення бітумів дорожніх, модифікованих полімерами, бітумів дорожніх, модифікованих комплексами добавок, модифікованих емульсій бітумних дорожніх).

Під час влаштування гідроізоляційної системи використовується обладнання: компресор; обладнання для сушіння основи гарячим повітрям (газові пальники чи теплова гармата); міксер; валики з ворсом середньої довжини з розчинно-стійкого матеріалу; набір реверсивних сопел з обмежувачами розпилу; багатокомпонентна насосна система, встановлена на мобільний візок; шланги високого тиску; розпилювальні пістолети з шарнірним роз'ємом для розпилювальних шлангів; набір змінних ніпелів для пістолетів; поліетиленові листи для захисту основи від бризок під час розмішування та захисту від розбризкування під час розпилення; ручні візки для транспортування бочок із матеріалом.

Виконана за проєктом гідроізоляція повинна бути:

– водонепроникною по всій поверхні, яку ізолюють, у місцях сполучення з водовідвідними трубками та конструкціями деформаційних швів;

– герметичною у місцях примикань до тротуарів та інших виступаючих елементів;

– міцно зчепленою із ізольованою поверхнею і зберігати міцність зчеплення за зсуву;

– міцною і зберігати еластичність у часі та інтервалі розрахункових температур;

– монолітною та безперервною, без здуття, бульбашок та хвилястості;

– цілісною та зберігати гідроізоляційні властивості, не ушкоджуватись у разі тривалих впливів постійної та тимчасової навантаги і можливих деформацій цементобетону у разі виникнення на ізольованій поверхні тріщин з розкриттям, допустимих нормами проєктування (розкриттям до 0,3 мм) відповідно до вимог;

– здатною перекривати тріщини;

– хімічно та біологічно стійка та стійка до проникнення хлорид-іонів;

– тепло та морозостійка, вплив теплової навантаги не повинен істотно впливати на показники матеріалу;

– без компонентів, які спричинюють корозію цементобетону та металу.

Висновки.

1. Розроблено рекомендації з підготовки поверхні для улаштування гідроізоляційної системи, які доповнюють діючі нормативні документи України.
2. Наведено основні технологічні операці та особливості улаштування гідроізоляційної системи.

Література

1. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Федоренко О. В., Гаркуша І. Ю. Застосування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних спорудах. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 2024, № 25. С. 74 – 86. URL: http://bttrp.diit.edu.ua/article/view/303313/295395 (дата звернення: 01.03.2026).
2. Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP2 - Flüssigkunststoff-Abdichtungen,. Erfassen der Verbundproblematik, 2015, 1505, VSS 2006/509. P 128.
3. Компанія SCHMIDT+PARTNER. URL: https://schmidtundpartner.ch/projekt/n12-viaduc-du-lac-de-la-gruyere (дата звернення: 01.03.2026).
4. Компанія Bänziger Partner AG. URL: https://www.bp-ing.ch/projekte-sammlung/lehnenbruecke-beckenried (дата звернення: 01.03.2026).
5. Zhou Lu, Zhang Dan, Li Xiaogang, Gao Zhiwei, Chen Qian & Wang Chaohui (2022). Overview: Application of Resin Waterproof Adhesive Materials in Bridge Deck Pavement in China. Advances in Civil Engineering., 2022, Article ID 2320374. P. 15. URL: https://doi.org/10.1155/2022/2320374 (дата звернення: 01.03.2026).
6. Bundesministerium für Verkehr. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen – Dichtungsschicht aus Flüssigkunststoff ZTV-BELB, Teil 3, 1987.
7. Bundesministerium für Verkehr. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen – Dichtungsschicht aus Flüssigkunststoff ZTV-BELB, Teil 3, 1995.
8. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS. Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken, SN 640450, 2005.
9. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS. Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken, SN 640450a, 2009.
10. Richtlinien für Konstruktive Einzelheiten von Brücken, Kapitel 5: Abdichtungen und Beläge (Stand Revision 2005).
11. European Organisation for Technical Assessment EOTA. Leitlinie für die Europäische technische Zulassung für Bausätze für flüssig aufzubringende Brückenabdichtungen, ETAG 033, 2010.
12. Гаркуша М. В. Захист бетонних та металевих конструкцій транспортного та гідротехнічного будівництва із застосування метилметакрилатів. *Дороги і мости*. Київ, 2025. Вип. 32. С. 257 – 271. URL: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.32.257 (дата звернення: 01.03.2026).

References

1. Onyshchenko A. M., Harkusha M. V., Fedorenko O. V., Harkusha I. YU. Zastosuvannya hidroizolyatsiynykh system na osnovi metylmetakrylatnoyi smoly na transportnykh sporudakh [Application of waterproofing systems based on methyl methacrylate resin on transport structures]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka [Bridges and tunnels: theory, research, practice]*, 2024, № 25. С. 74 – 86. URL: http://bttrp.diit.edu.ua/article/view/303313/295395 (in Ukrainian).
2. Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP2 - Flüssigkunststoff-Abdichtungen,. Erfassen der Verbundproblematik, 2015, 1505, VSS 2006/509. P 128.
3. Компанія SCHMIDT+PARTNER. URL: https://schmidtundpartner.ch/projekt/n12-viaduc-du-lac-de-la-gruyere
4. Компанія Bänziger Partner AG. URL: https://www.bp-ing.ch/projekte-sammlung/lehnenbruecke-beckenried
5. Zhou Lu, Zhang Dan, Li Xiaogang, Gao Zhiwei, Chen Qian & Wang Chaohui (2022). Overview: Application of Resin Waterproof Adhesive Materials in Bridge Deck Pavement in China. Advances in Civil Engineering., 2022, Article ID 2320374. P. 15. URL: https://doi.org/10.1155/2022/2320374
6. Bundesministerium für Verkehr. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen – Dichtungsschicht aus Flüssigkunststoff ZTV-BELB, Teil 3, 1987.
7. Bundesministerium für Verkehr. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen – Dichtungsschicht aus Flüssigkunststoff ZTV-BELB, Teil 3, 1995.
8. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS. Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken, SN 640450, 2005
9. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS. Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken, SN 640450a, 2009.
10. Richtlinien für Konstruktive Einzelheiten von Brücken, Kapitel 5: Abdichtungen und Beläge (Stand Revision 2005).
11. European Organisation for Technical Assessment EOTA. Leitlinie für die Europäische technische Zulassung für Bausätze für flüssig aufzubringende Brückenabdichtungen, ETAG 033, 2010.
12. Harkusha M. V. Zakhyst betonnykh ta metalevykh konstruktsiy transportnoho ta hidrotekhnichnoho budivnytstva iz zastosuvannya metylmetakrylativ. [Protection of concrete and metal structures of transport and hydraulic engineering construction using methyl methacrylates]. *Dorohy i mosty [Roads and Bridges]*. Kyiv. 2025. 32. С. 257 – 271. URL: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.32.257 (in Ukrainian).

УДК 691:519.24

ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ МІНЕРАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ НА ПОШКОДЖЕНІСТЬ ДЕКОРАТИВНИХ БЕТОНІВ

Ільницький А. М.[1,a], **Довгань О. Д.**[1,b,*]

[1] *Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна*

[a] *Студент 5 курсу;* [b] *Канд. техн. наук, доцент кафедри процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів;*

[*] *Автор для листування: aleks.dovhan@odaba.edu.ua*

Анотація. *Представлені результати дослідження пошкодженості, отримані при розробці декоративного бетону для архітектурних елементів. Експериментально підтверджено – якісний і кількісний склад мінеральних високодисперсних наповнювачів, при різній величині пластифікації розчинових сумішей та гранулометрії піску здійснюють вагомий вклад в зниження пошкодженості бетону, що в підсумку надає можливість зберегти художньо-естетичну виразність архітектурним виробам.*

Ключові слова: *декоративний бетон, пошкодженість, скляна фібра, цеоліт.*

DETECTION OF THE INFLUENCE OF MINERAL FILLERS ON THE DAMAGE OF DECORATIVE CONCRETE

Ilnitsky A. M.[1,a], **Dovgan O. D.**[1,b,*]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

[a] *5th-year student;* [b] *PhD, Assoc. Prof. at the Dept. of Processes and Apparatuses in the Technology of Building Materials*

[*] *Corresponding author: aleks.dovhan@odaba.edu.ua*

Abstract. *The results of damage study obtained during the development of fine-grained concrete for architectural elements are presented. Experimentally confirmed, the qualitative and quantitative composition of highly dispersed fillers, with different values of plasticization of mixtures and granulometry of sand, makes a significant contribution to reducing damage of composite, which ultimately makes it possible to maintain artistic and aesthetic expressiveness of architectural products.*

Key words: *decorative concrete, damage, glass fiber, zeolite.*

Актуальність дослідження. Під час експлуатації декоративні бетони в архітектурних елементах будинків і споруд піддаються прихованій руйнації від несилового синергетичного впливу різноманітних зовнішніх факторів. До кліматичних чинників, негативну дію котрих постійно сприймають елементи

декору під час експлуатації можна віднести різкі коливання температури, вплив вологи, градієнти температури й вологи за перетином виробів тощо [1-2].

В багатьох роботах показано, що більшість комбінованих навантажень суттєво пришвидшує розвиток наявних та утворення нових пошкоджень в бетоні. В механічному аспекті пошкодження матеріалу фізично інтерпретують як присутність розсіяних в його об'ємі різних мікроскопічних дефектів (пор, тріщин, капілярів тощо), котрі появляються в найбільш слабких і перенапружених місцях структури матеріалу та є причиною поступового його руйнування.

Для аналізу впливу початкового складу бетону і кліматичних факторів на структурні параметри матеріалу виробів застосовано новий спосіб визначення пошкодженості [3]. Метод передбачає поетапне дослідження бетонних зразків за двома характеристиками – міцністю на розтяг при згині та коефіцієнтом пошкодженості.

Аналіз публікацій. Огляд літературних джерел [4-9] показав, що для отримання виробів з меншою величиною пошкодженості декоративного бетону необхідно до складу пластифікованої суміші вводити наповнювачі, що є різними за природою, розміром і геометричною формою.

В низці робіт вказується, що використання наповнювачів (тонкомеленого кварцового піску, вапняку, доменного шлаку та ін.), раціональних за дисперсністю й кількістю, сприяє зниженню пошкодженості завдяки зменшенню загальної кількості зародкових тріщин, їх протяжності, уповільненню розвитку тріщин тощо. Також у працях зазначається, що тонковолокнисті наповнювачі всіх видів зміцнюють цементну матрицю композитів, знижують концентрацію напружень у вершинах тріщин, уповільнюючи у такий спосіб поширення тріщин на границі розділу матеріальних складових бетону. Проте вплив фібри на динаміку пошкодженості залежить від її механічного закріплення, диспергування в об'ємі структури матеріалу, а також прямого контакту кожного волокна з в'яжучою матрицею. З огляду на це важливо проєктувати склади бетону із структурою, яка б могла рівномірно розподіляти напруження в мікродефектах та бути стійкою до розвитку цих чи появи нових дефектів під впливом кліматичних навантажень під час експлуатації виробів. Отже, для отримання декоративного бетону з меншою величиною пошкодженістю доцільно використовувати наповнювачі, введення яких дозволить зміцнити міжфазну поверхню розділу матриці та запобігти легкому поширенню в ній мікродефектів.

Метою роботи є підвищення довговічності архітектурних виробів за рахунок зниження пошкодженості декоративного бетону.

Умови експерименту, методика досліджень. Експеримент з визначення властивостей бетону проводився за 5-ти факторним 27-ми точковим планом [10]. Варіювались дві групи факторів складу: *модифікатори цементно-піщаної системи та параметри дисперсного армування*.

В *першу групу* увійшли тонкомелений цеоліт в кількості Z = 4±4%, доля дрібнозернистого піску в суміші з крупнозернистим SG = 50±20%, суперпластифікатор MF = 0.5±0.2%.

Другу групу склали дискретні волокна, довжиною 6 і 12 мм, які дозувались за масою суміші в кількості $F6 = F12$ = 0.015±0.015%, відповідно.

Фіксованими компонентами бетону були вміст цементу та заповнювача, при їх співвідношенні 1:3.4 за масою суміші. Склади сумішей виготовлялися з різним водо-цементним співвідношенням.

Дослідження пошкодженості різних за складом композитів передбачало: випробування зразків-призм в сухому стані на міцність на розтяг при згині згідно з ДСТУ Б В.2.7-239:2010, сканування половинок розламаних зразків, отримання цифрових 3D-моделей зразків, визначення площі поверхні розлому (S_P) та площі основи (S_O) досліджуваних зразків. Як критерій прийнято коефіцієнт пошкодженості $K_П$, який обчислювався за формулою (1):

$$K_П = S_O / S_P \ . \qquad (1)$$

Моделювання результатів експерименту. За чисельними даними пошкодженості бетону будувались експериментально-статистичні моделі [10]. Аналіз коефіцієнтів моделей показав, що введення до початкового складу композицій дискретної арматури різної довжини дозволяє підвищити надійність функціональних характеристик матеріалу в архітектурних виробах. Присутність скляної фібри сприяє контролю зародження й розповсюдження мікродефектів у структурі композитів. Найменшою величиною пошкодженості володіють гібридно-армовані склади бетону. Зокрема встановлено, що для отримання найменш пошкоджених композитів недостатньо виготовляти їх лише з початково-низьким водо-цементним співвідношенням. Для зміцнення структури між матеріальними дискретними складовими матриці необхідно частково цементне в’яжуче замінювати тонкодисперсним цеолітом, в кількості щонайменше 3%. Позитивний вплив цеолітового наповнювача на зниження пошкодженості скоріш за все пов'язаний з його пуцолановою природою. Взаємодія активних оксидів SiO_2 і Al_2O_3 цеоліту з портландитом цементної речовини ймовірно дозволяє ущільнити перехідну область матриці. Внаслідок

чого, мікродефекти на границі розділу є дещо меншими за розміром, ніж в зоні контакту зерен піску й цементу. Однак, зважаючи на високо пористу структуру цеоліту та з метою підвищення коефіцієнту використання міцності фібри, необхідно збільшувати рівень пластифікації розчинних сумішей.

Виявлено, що в зниженні пошкодженості бетонів важливу роль теж відіграє гранулометричний склад піщаного заповнювача. В більшості випадків область максимальних значень коефіцієнту пошкодженості досягається на високо пластифікованих складах композиту з більшим вмістом дрібнозернистого піску. При такій гранулометрії заповнювача дискретна арматура краще укладається між дрібними зернами піску, збільшуючи тим самим енергію руйнування бетону.

Висновки.

1. Експериментально підтверджено – якісний і кількісний склад високодисперсних наповнювачів, при різній величині пластифікації сумішей та гранулометрії піску здійснюють вагомий вклад в зниження пошкодженості декоративного бетону, що в підсумку надає змогу зберегти художньо-естетичну виразність архітектурним виробам.
2. Дослідження інтегральних показників пошкодженості спільно з фізико-механічними властивостями дрібнозернистих композитів дозволять передбачати термін служби виробів.

Література

1. Architectural Precast Concrete / PCI Architectural Precast Concrete Manual Committee / Sidney Freedman Editor *et al.*, 2007. Third Edition. p. 588.
2. Довгань О.Д., Вировой В.М. Умови експлуатації енергоефективних декоративних матеріалів і виробів. *Сучасні проблеми енергозбереження в будівництві, містобудуванні та житлово-комунальному господарстві*: матеріали Всеукраїн. наук.-практ. конференції. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. С. 7-9.
3. Довгань О.Д., Довгань П.М., Вировой В.М., Хлицов М.В. Спосіб визначення пошкодженості бетону. Пат. 129391 Україна : МПК G01N33/38. № a2022 02726; заявл. 29.07.2022; опубл. 11.01.2023, Бюл. № 2.
4. Lemaitre J., Desmorat R. Engineering Damage Mechanics: Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures. Springer: Berlin and Heidelberg, 2005. 380p.
5. Daniel, I.M., Wooh, S.C., & Lee, J.W. Defect and Damage Characterization in Composite Materials. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1987, Vol. 6 A, pp. 1195-1202
6. Khoroshun L. P., Nazarenko L.V. Deformation and Damage of Composites with Anisotropic Components (Review). *International Applied Mechanics*, Vol. 49, No. 4, July, 2013.
7. Andrzej M. Brant. Cement-based composites: materials, mechanical properties, and performance. Taylor & Francis: London and New York, 2009.

8. Суханов В., Вировой В., Коробко О. Структура матеріалу у структурі конструкції: монографія. Одеса: ОДАБА, 2022. 412с.
9. Dovgan A.D., Vyrovoy V.M., Dovgan P.M. Crack resistance of decorative composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708.
10. Вознесенский В., Ляшенко Т. ЭС-модели в компьютерном материаловедении : материалы к 45-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов. Одесса: «Астропринт», 2006. 115с.

References

1. Architectural Precast Concrete / PCI Architectural Precast Concrete Manual Committee / Sidney Freedman Editor *et al.*, 2007. Third Edition. p. 588.
2. Dovhan O. D., Vyrovoi V. M. Umovy ekspluatatsii enerhoefektyvnykh dekoratyvnykh materialiv i vyrobiv [Conditions of operation of energy-efficient decorative materials and products]. *Suchasni problemy enerhozberezhennia v budivnytstvi, mistobuduvanni ta zhytlovo-komunalnomu hospodarstv* [Modern problems of energy saving in construction, urban development and housing and communal services]: materialy Vseukrain. nauk.-prakt. konferentsii. [materials of the All-Ukrainian scientific-practical conference] Zaporizhzhia: National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 2020. pp. 7-9.
3. Dovhan O. D., Dovhan P. M., Vyrovoi V. M., Khlytsov M. V. Sposib vyznachennya poshkodzhenosti betonu [Method for determining concrete damage]. Pat. 129391 Ukraine : IPC G01N33/38. № a2022 02726; decl. 29.07.2022 ; publ. 11.01.2023, Bull. № 2.
4. Lemaitre J., Desmorat R. Engineering Damage Mechanics: Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures. Springer: Berlin and Heidelberg, 2005. 380 p.
5. Daniel, I.M., Wooh, S.C., & Lee, J.W. Defect and Damage Characterization in Composite Materials. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1987, Vol. 6 A, pp. 1195-1202
6. Khoroshun L. P., Nazarenko L.V. Deformation and Damage of Composites with Anisotropic Components (Review). International Applied Mechanics, Vol. 49, No. 4, July, 2013.
7. Andrzej M. Brant Cement-based composites: materials, mechanical properties, and performance. Taylor & Francis: London and New York, 2009.
8. Sukhanov V., Vyrovoi V., Korobko O. Struktura materialu u strukturi konstruktsii [Material structure within the structural assembly]. Odesa: OSACEA, 2022. 412 p.
9. Dovgan A.D., Vyrovoy V.M., Dovgan P.M. Crack resistance of decorative composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708.
10. Voznesenskyi V., Liashenko T. ES-modely v kompiuternom materyalovedenyy [EC models in computer materials science]. Materyaly k 45-mu mezhdunarodnomu semynaru po modelyrovanyiu y optymyzatsyy kompozytov [Materials for the 45th international seminar on modeling and optimization of composites]. Odessa: «Astroprynt», 2006. 115 p.

УДК 69:502.131.1:620.9

СУЧАСНІ ПРОЦЕСИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГІЇ ТА РЕСУРСІВ, ЕКОЛОГІЇ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ У БУДІВЕЛЬНІЙ ГАЛУЗІ

Рапач К. В.[1,a], **Чечнєв Ю. В.**[1,a], **Шинкевич О. І.**[1,a], **Шинкевич О. С.**[1,b,*]

[1] *Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна*
[a] *Аспірант кафедри процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів*
[b] *Д-р техн. наук, професор кафедри процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів*
[*] *Автор для листування: Olena.shynkevych@gmail*

Анотація. *У статті розглядаються та аналізуються можливості використання екологічно безпечних і економічно вигідних, так званих «олегшених» будівельних технологій для виробництва малоенергоємних сучасних композитних матеріалів, модифікованих природними компонентами та техногенними відходами: природними, будівельними, техногенними гіпсами. Проводиться аналіз і порівняння впливу компонентів, що містять гіпс, на силікатні та алюмосилікатні блоки стін, а також на якість дорожніх покриття. Отримані матеріали та вироби є перспективними і вирізняються високими фізичними та механічними властивостями.*

Ключові слова: *екологічність , економічність, энерго ресурсосбереження ”олегшені” технології, комфортність .*

MODERN PROCESSES OF ENERGY AND RESOURCE CONSERVATION, ECOLOGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Rapach K. V.[1,a], **Chechnev Yu. V.**[1,a], **Shynkevych O. I.**[1,a], **Shynkevych O. S.**[1,b,*]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*
[a] *PhD student at the Dept. of Processes and Apparatuses in the Technology of Building Materials*
[b] *DSc, Prof. at the Dept. of Processes and Apparatuses in the Technology of Building Materials*
[*] *Corresponding author: Olena.shynkevych@gmail*

Abstract. *The article considers and analyzes the possibilities of using environmentally safe and cost-effective, so-called "lightweight" construction technologies for the production of low-energy-intensive modern composite materials modified with natural components and man-made waste: natural, construction, man-made gypsum. The effect of gypsum-containing components on silicate*

and aluminosilicate wall blocks, as well as on the quality of road surfaces, is analyzed and compared. The resulting materials and products are promising and have high physical and mechanical properties.

Keywords: *environmental friendliness, economy, energy saving, "lightweight" technologies, comfort.*

Атуальність дослідження. Характерна особливість цього періоду часу полягає у збереженні екосистеми планети. Один із прогресивних напрямів сучасного матеріалознавства в будівельній галузі - це розробка і застосування композитів на основі багатокомпонентних нерівноважних і сильно нерівноважних систем. Один із можливих варіантів переходу систем у сильно нерівноважний стан полягає в реалізації комплексу технологічних прийомів у вигляді взаємопов'язаних і взаємовпливових різного виду процесів активації на різних стадіях технологій. У статті стисло викладено розробку та подальший розвиток науково-теоретичних засад одержання комплексно-активованих композитів тепловологісного та нормального твердіння на багаторівневому вапняно-кремнеземистому в'яжучому, модифікованому органо-мінеральним комплексом добавок. Заміна зовнішніх жорстких режимів активації в автоклавах на легкі, внутрішні резерви складної системи за рахунок розроблення полегшених технологічних нововведень у плані навантаження на екосередовище, екосистему та економіку, забезпечить скорочення витрат більш ніж на порядок. Збереження екосистеми Землі - одне з основних завдань людства. У цих умовах перед технологами і виробниками стоять завдання, що охоплюють як економічні, так і екологічні аспекти виробництва будівельних матеріалів. До одного з екологічно чистих, якісних, комфортних і затребуваних стінових будівельних матеріалів належать вироби на основі вапняно вмісного в'яжучого. Комплексне вирішення питань енерго- і ресурсозбереження, підвищення якості продукції на основі керованого структуроутворення робить виробництво стінових виробів на вапняно-кремнеземистому в'яжучому за не автоклавною технологією конкурентоспроможной в умовах сучасних економічних задач.

Особливості композитів на основі нерівноважних дисперсних сумішей. Один із прогресивних напрямів сучасного матеріалознавства - це композити на основі нерівноважних і сильно нерівноважних дисперсних систем. У будівельному матеріалознавстві цей напрям реалізується за рахунок застосування різних видів і способів активації. Композитам на основі нерівноважних дисперсних систем притаманні свої власні закономірності поведінки, відмінні від класичних силікатних бетонів, основи яких були розроблені за участі Міхаєліса (1883 р.). Тому актуальним є вивчення й аналіз

локальних закономірностей зміни властивостей у композитах на основі нерівноважних дисперсних систем [1,2].

У роботі представлено розробки матеріалів нового покоління на основі комплексно активованої силікатної суміші, які поєднують у собі комплекс властивостей, що забезпечують комфорт і якість житлових приміщень. Ці матеріали виробляються за литою технологією із застосуванням сучасних нанотехнологічних прийомів. Впровадження таких прогресивних технологічних ліній дасть змогу скоротити витрату питомого палива на 42-50% і на порядок - електроенергії.

Основні переваги технологій та властивості сучасних материалів. Ці вироби вирізняються зниженою щільністю за досить високої міцності, високими водо-, морозо- і тріщиностійкістю, а також теплоємністю. Завдяки цим властивостям створюються комфортні умови в житлових приміщеннях зі стабільним температурним режимом протягом доби, незалежно від сезону. Пошарова будова виробів із цього матеріалу ідентична "інтелектуальному" композиту як кістка, але поки що в пасивному варіанті. Внутрішня структура композитів є копією вулканічних порід, таких як пемза, туфи, а за певних умов твердіння - пористих вапняків та їхніх різновидів. Під час розроблення "інтелектуальних" будівельних композитів необхідно виявити чинники, що керують процесами структуроутворення на всіх рівнях, включно з мікро-кристалічним. Матеріали, що розробляються на основі створених композитів на силікатній матриці, мають володіти такими нестандартними властивостями: можливістю активної регенерації, включно із самовідновленням і самолікуванням тріщин, самоочищенням поверхні, акумулюванням зовнішньої енергії, природним "диханням" огороджувальних конструкцій та ін.

Роль комплексний активації в формуванні властивостей. Комплексна активація здійснюється у водному середовищі за допомогою швидкісних змішувачів-активаторів і реалізується через послідовний цикл елементарних технологічних процесів. Комплексна активація містить послідовний цикл різних шості видів і способів активації: кожен вид активації створює умови для проведення наступного виду активації. Великі дослідження з активації показують позитивний вплив на властивості різних видів дефектів і дислокацій. В умовах комплексної активації усувається протиріччя, пов'язане зі збільшенням розчинності кварцу і зниженням розчинності вапна [3].

Концептуальна модель складних полікомпонентних силікатних композитів базується на аналізі з позиції в'язко-текучих і тверднучих у часі систем, які описуються як "нелінійне ціле в нелінійному цілому". Далі розглянуто процеси,

явища та об'єкти з урахуванням сучасної нелінійної теорії коливань і хвиль, теорії самоорганізації відкритих систем, теорії дисипативних структур.

Особливості ’’олегшених” технологій виробництва силікатних и алюмосилікатных будівельних виробів. Технологія комплексно активованих силікатних композитів являє собою послідовність нерівноважних процесів, що відбуваються далеко від рівноваги. Одним з актуальних завдань матеріалознавства є опис механізмів просторово-часових процесів для різних видів активованих дисперсних систем на різних масштабних рівнях структури. Нині ставлять завдання аналізу впливу всіх рівнів сумішей на структуру і властивості матеріалів.

Запропоновано механізм "трансферної" технології транспортування мікроелементів через мембранні шари закритих капілярів і всередину мембранних шарів відкритих капілярів у природних пористих кремнеземістих порід. Реалізація такого механізму забезпечує додаткову активацію просторово-часових процесів і поліпшення показників якості порівняно із силікатами на кварцовому піску. Термодинамічні процеси активації різних видів модифікацій кварцу, своєю чергою, відрізняються процесі активації різних видів вапна: з підвищенням температури розчинність вапна знижується, а швидкість його розчинення зростає, розчинність кремнезему при цьому збільшується

Використовуючи полікомпонентний склад з вапняних і кремнеземистих компонентів спостерігається послідовність фазових переходів. Регулювання швидкості розчинення вапна і кремнезему дає змогу зміщувати точки фазових переходів у той чи інший бік. Одним з інноваційних рішень є застосування негашеного вапна замість гашеного або негашеного спільно з гашеним [4]. Приготування суміші здійснюється у швидкісних змішувачах активаторах. У змішувачах такого роду розвивається композиційна турбулентна конвекція в'язко-текучої системи, для якої характерна швидка зміна темпоритмів процесів, що відбуваються.

Перспективи реалізації алюмосилікатних сумішей в нормальних температурних умовах. Реалізація процесів як "нелінійне ціле в нелінійному цілому" показує, що кореляція виявляє ступінь узгодженості всіх компонентів системи. Важливим є супутній комплексній активації ефект поліморфного переходу добавки природного будівельного гіпсу у водостійкий ангідрид.

За оптимальної кореляцією система стає цілісною. Використання алюмосилікатів, розчинення яких відбувається за принциповою схемою, у вигляді дісперсніх композицій, забезпечує їх твердіння в нормальних

температурних умовах. Сфера їх застосування - реставраційні, штукатурні та декоративні розчини .

Таблиця 1

Недоліки та переваги силікатних матеріалів автоклавного та неавтоклавного твердіння

Існуючі автоклавні силікатні цегли (недоліки)	**Розроблений прогресивний силікатний матеріал неавтоклавного твердіння (переваги)**
1. Низькі теплові властивості — огороджуючі конструкції потребують додаткового теплового захисту або (багатошарова версія стіни)	1. Висока теплоізоляційні властивості — забезпечує необхідний тепловий опір при одношаровій версії стіни
2. Висока щільність — звичайний матеріал	2. Низька щільність — це ефективний і умовно-евективний матеріал
3. Низька водостійкість	3. Висока водостійкість
4. Висока енергоємність виробництва	4. Знижується енергоємність виробництва за рахунок розробленої технології

Таблиця 2

Основні експлуатаційні властивості

Марка	М150	М150	М150
Клас	В12.5	В12.5	В12.5
Щільність	1800-2000	1450-1550	1250-1400
По ДСТУ БВ.2.7-80-98	важкий	олегшений **(н/а)**	легкий **(н/а)**
Теплопровідність	0.76-0.80	0.45-0.54	0.35-0.45
Морозостійкість	F15-50	F15-50	F15-50
Водостійкість	0.8	0.9	0.85

Висновок. Синергетична комбінація основних компонентів і модифікаторів, що підбираються з урахуванням їхньої спорідненості, забезпечує отримання композитів на силікатній або алюмосилікатній матриці, показники яких значно вищі, ніж у традиційних силікатних бетонів. При цьому щільність теплопровідність їх значно нижча, що забезпечує комфортні умови в приміщеннях за незначних енерговитрат. Енерговитрати скорочуються у десятки разів та поліпшується екологічне середовище Землі.

Література | References

1. O. Shynkevych. Multiple influence of silicacontaining component of the chemo-biogenic origin on the structure and properties of compo-sites on silicate matrix Tehnički glasnik / O. Shynkevych, Y. Lutskin, A. Aniskin // Technical Journal. – Varazdin, Croatia, 2017. – Volume 11 (4-2017). – P.160-165. – Режим ступу: https://hrcak.srce.hr/190992 (WoS)
2. O. Shynkevych. Nanotechnological and Energy-saving Methods of Production of Building Composites / O. Shynkevych, Y. Lutskin, O. Koichev, G. Bondarenko, A. Tertychnyi, I. Myronenko // MATEC Web Conf. – Volume 116, 2017. – P. 01015 (10). URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/201711601015 (SCOPUS)
3. O. Shynkevych. The influence of the con-tent on structure and properties of geopolymer composites on silicate matrix / O. Shynkevych, I. Myronenko, S. Zakabluk, O. Surkov // MATEC Web of Conferences 230, 03011 (2018). URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/201823003011 (SCOPUS)
4. Olena Shynkevych. Nanotechnological Techniques of Obtaining Building Composites on a Silicate Matrix of Thermo-Moisture Hardening / Olena Shynkevych, Yevgen Lutskin, Oleksiy Surkov, Igor Myronenko // *Materialsorum*. – Vol. 968. – pp. 44-49, 2019. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.44 (SCOPUS)

УДК 691:699.86:697

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ЯК ОСНОВА ФОРМУВАННЯ КОМФОРТНОГО МІКРОКЛІМАТУ В СУЧАСНИХ БУДІВЛЯХ

Євдокімова С. Л.[1,a], **Комлева Т. М.**[1,b,*]

[1] *Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна*

[a] *Студентка 1 курсу;* [b] *Старший викладач кафедри економіки та підприємництва*

[*] *Автор для листування: komlevatn411@odaba.edu.ua*

Анотація. *У статті досліджено фізичні принципи використання енергоефективних будівельних матеріалів у сучасному будівництві. Показано, що застосування ефективних теплоізоляційних матеріалів сприяє суттєвому зменшенню тепловтрат будівель, підвищенню їх енергоефективності та формуванню комфортного мікроклімату в приміщеннях. Проведено аналіз основних характеристик теплоізоляційних матеріалів, зокрема теплопровідності та густини, а також їх впливу на тепловий баланс будівель. Виконано порівняльний розрахунок теплового опору стінових конструкцій із застосуванням різних видів утеплювачів. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні енергоефективних будівель та вдосконаленні огороджувальних конструкцій*.

Ключові слова: *енергоефективність, будівельні матеріали, теплоізоляція, мікроклімат будівель, теплопередача*.

ENERGY-EFFICIENT BUILDING MATERIALS AS A BASIS FOR FORMING A COMFORTABLE MICROCLIMATE IN MODERN BUILDINGS

Yevdokimova S. L.[1,a], **Komleva T. M.**[1,b,*]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

[a] *1st-year student; b Senior Lecturer at the Dept. of Economics and Entrepreneurship*

[*] *Corresponding author: komlevatn411@odaba.edu.ua*

Abstract. *The article examines the physical principles of using energy-efficient building materials in modern construction. It is shown that the application of effective thermal insulation materials significantly reduces heat losses in buildings, increases their energy efficiency, and contributes to the formation of a comfortable indoor microclimate. An analysis of the main characteristics of thermal insulation materials, in particular thermal conductivity and density, as well as their influence on the thermal balance of buildings, is presented. A comparative calculation of the thermal resistance of wall structures using different types of insulation materials was performed. The*

obtained results can be used in the design of energy-efficient buildings and in improving building envelope structures.

Keywords: *energy efficiency, building materials, thermal insulation, indoor microclimate, heat transfer*.

Актуальність дослідження. У сучасних умовах питання раціонального використання енергетичних ресурсів набуває особливої важливості. Значна частина енергії, що споживається у світі, використовується для забезпечення теплового режиму будівель. Одним із найбільш ефективних шляхів зменшення енергоспоживання є підвищення теплоізоляційних властивостей огороджувальних конструкцій за рахунок застосування сучасних енергоефективних матеріалів. Дослідження фізичних процесів теплопередачі у будівлях дозволяє оптимізувати конструктивні рішення та забезпечити комфортні умови проживання.

Проблема забезпечення комфортного мікроклімату у будівлях безпосередньо пов’язана з фізичними процесами теплопередачі в огороджувальних конструкціях. Недостатня теплоізоляція призводить до значних тепловтрат, підвищення витрат на опалення та погіршення умов проживання. Тому дослідження фізичних основ застосування сучасних теплоізоляційних матеріалів є важливим завданням будівельної науки.

Стан проблеми. Питання енергоефективності будівель та використання теплоізоляційних матеріалів широко досліджуються у сучасній науковій літературі.

У роботах багатьох вчених розглядаються фізичні процеси теплопередачі у будівельних конструкціях та можливості їх оптимізації шляхом використання сучасних матеріалів [2]. Значна увага приділяється розробці нових теплоізоляційних матеріалів, що характеризуються низькою теплопровідністю та високою довговічністю [3].

Разом з тим, питання підвищення енергоефективності будівель залишається актуальним, особливо в умовах зростання вартості енергоресурсів та необхідності зменшення впливу на навколишнє середовище.

Мета роботи. Аналіз фізичних основ застосування енергоефективних будівельних матеріалів та визначення їх ролі у формуванні комфортного мікроклімату сучасних будівель.

Метод розрахунку. Для оцінювання енергоефективності огороджувальних конструкцій використано метод розрахунку теплового опору багатошарових стінових конструкцій. Розрахунок виконано відповідно до положень будівельної фізики та нормативних вимог щодо теплової ізоляції будівель. Тепловий опір

конструкції визначається як сума опорів окремих шарів матеріалів, що входять до її складу. Для порівняння ефективності різних утеплювачів проведено розрахунок теплотехнічних характеристик конструкції з використанням мінеральної вати, пінополістиролу та пінополіуретану.

Розрахунок теплового опору багатошарової огороджувальної конструкції виконується за формулою [3]:

$$R = \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i}, \tag{1}$$

де R – загальний тепловий опір огороджувальної конструкції, м²·К/Вт; d_i – товщина i-го шару матеріалу, м; λ_i – коефіцієнт теплопровідності i-го матеріалу, Вт/(м·К); n – кількість шарів конструкції.

Коефіцієнт теплопередачі U конструкції, Вт/(м²·К), визначається як обернена величина теплового опору:

$$U = \frac{1}{R}. \tag{2}$$

Розрахунки виконувалися для типових огороджувальних конструкцій житлових будівель при стандартних температурних умовах експлуатації.

Таблиця 1

Порівняння фізичних, енергетичних та економічних характеристик теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	λ, Вт/(м·К)	$R_З$, м²·К/Вт	R, м²·К/Вт	ρ, кг/м³	R, Вт/(м²·К)	Q, кВт·год/м²	Ціна, €/м²	$T_{сл}$, років
Мінеральна вата	0,041	2,44	2,94	35–150	0,34	120	10–14	40
Пінополістирол	0,038	2,63	3,13	15–35	0,32	110	8–12	35
Пінополіуретан	0,028	3,57	4,07	30–80	0,25	85	18–25	50

Отримані результати. Проведений аналіз показав, що застосування сучасних теплоізоляційних матеріалів дозволяє істотно підвищити тепловий опір огороджувальних конструкцій. Найбільший тепловий опір отримано при використанні пінополіуретану, що пояснюється його низьким коефіцієнтом теплопровідності. Використання мінеральної вати та пінополістиролу також забезпечує достатній рівень теплоізоляції та широко застосовується у практиці будівництва. Результати розрахунків підтверджують, що правильний вибір теплоізоляційного матеріалу сприяє зменшенню тепловтрат будівлі та підвищенню її енергоефективності.

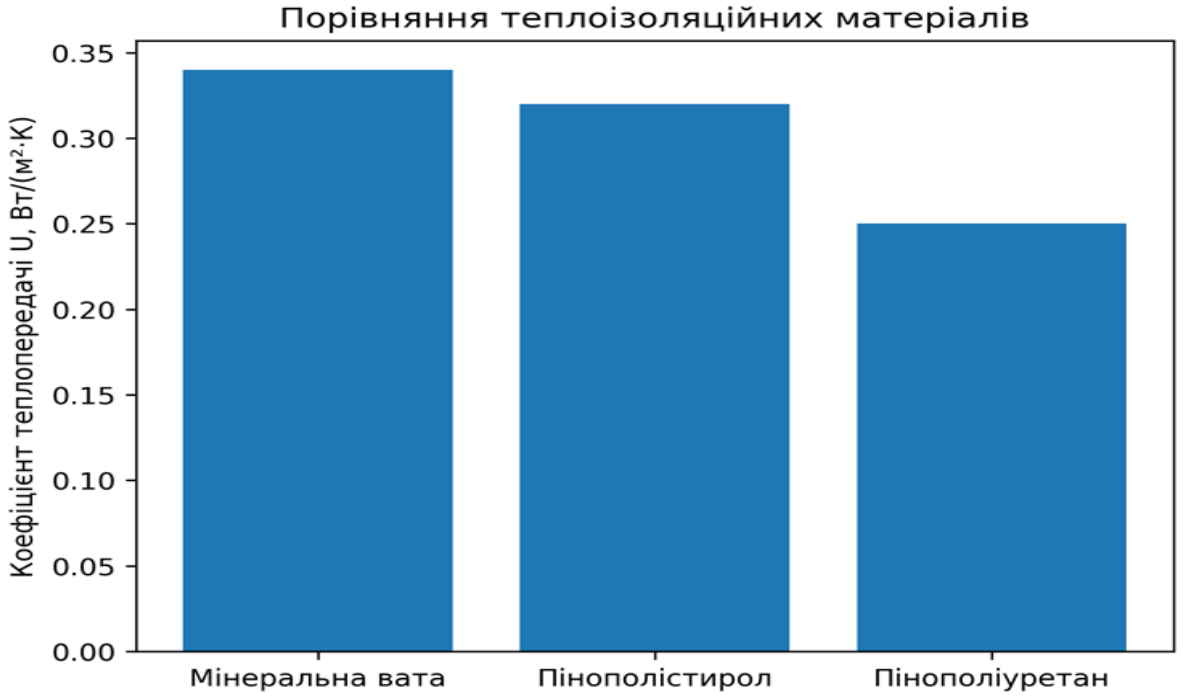


Рис.1. Порівняльний аналіз результатів

Як видно з графіка, найменший коефіцієнт теплопередачі має конструкція з використанням пінополіуретану, що свідчить про його високу теплоізоляційну ефективність. Це дозволяє значно зменшити тепловтрати будівлі та підвищити її енергоефективність.

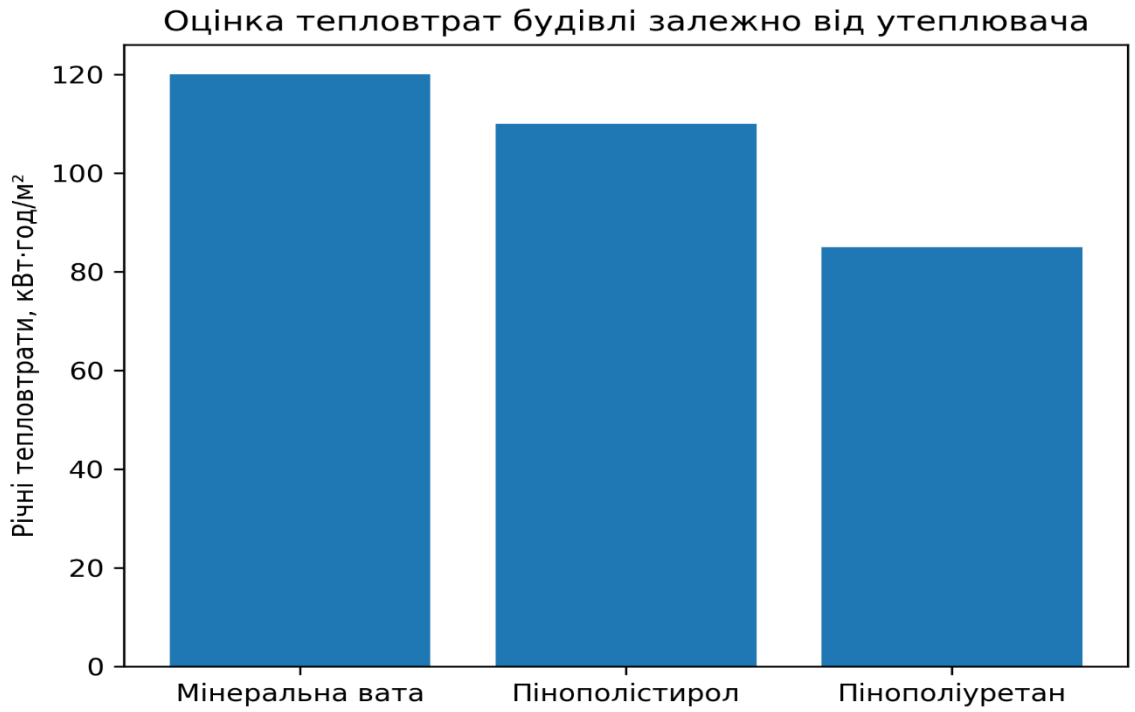


Рис. 2. Аналіз енергетичних втрат

Мінеральна вата та пінополістирол також демонструють високі показники теплоізоляції та широко застосовуються у сучасному будівництві завдяки оптимальному співвідношенню вартості та ефективності.

Результати дослідження підтверджують, що правильний вибір теплоізоляційного матеріалу може зменшити тепловтрати будівлі на 30–40 %, що сприяє зниженню витрат на опалення та покращенню мікроклімату у приміщеннях.

Висновки.

1. У результаті проведеного дослідження проаналізовано фізичні основи використання енергоефективних будівельних матеріалів у сучасному будівництві.
2. Встановлено, що застосування теплоізоляційних матеріалів дозволяє значно підвищити тепловий опір огороджувальних конструкцій та зменшити тепловтрати будівель.
3. Проведені розрахунки показали, що серед розглянутих матеріалів найбільш ефективним є пінополіуретан, який характеризується мінімальним коефіцієнтом теплопровідності.
4. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні енергоефективних будівель та виборі оптимальних теплоізоляційних матеріалів.

Таким чином, використання сучасних енергоефективних будівельних матеріалів є важливим напрямком підвищення енергоефективності будівель, зниження споживання енергоресурсів та забезпечення комфортного мікроклімату у приміщеннях.

Література

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. – Київ: Мінрегіон України, 2022.
2. Сніпко О. В. Будівельна фізика : підручник. – Київ: КНУБА, 2018. – 320 с.
3. Енергоефективність будівель : підручник / за ред. О. І. Дяченка. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2020. – 280 с.
4. European Commission. Energy efficiency in buildings. – Brussels: European Commission, 2022.
5. International Energy Agency. Buildings Energy Outlook 2023. – Paris: IEA, 2023.

References

1. DBN V.2.6-31:2021. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel [Thermal insulation and energy efficiency of buildings]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2022.
2. Snipko O. V. Budivelna fizyka [Building physics]. Kyiv: KNUBA, 2018.
3. Dyachenko O. I., editor. Enerhoefektyvnist budivel [Energy efficiency of buildings]. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2020.
4. European Commission. Energy efficiency in buildings. Brussels: European Commission, 2022.
5. International Energy Agency. Buildings Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023.

УДК 699.86+691

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПІДВИЩЕНИМИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Лизько М. М. [1,a], **Кравченко С. А.** [1,b,*]

[1] *Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна*

[a] *Студентка 3 курсу;* [b] *Канд. техн. наук, доцент кафедри залізобетонних конструкцій та транспортних споруд*

[*] *Автор для листування: ck@odaba.edu.ua*

Анотація. *У сучасній будівельній галузі однією з найбільш пріоритетних задач є підвищення енергоефективності будівель, що тісно пов'язано з розвитком та вдосконаленням огороджувальних конструкцій. Особливий акцент робиться на розробці конструкцій із покращеними теплоізоляційними властивостями, здатних зменшувати рівень тепловтрат, забезпечувати високий рівень термічного комфорту та сприяти зниженню енергоспоживання в будівлях. У дослідженні проведено аналіз сучасних матеріалів та конструктивних рішень для формування зовнішніх стін, покрівель і світлопрозорих елементів. Вивчено вплив теплотехнічних характеристик огороджувальних конструкцій на загальну енергетичну ефективність будівель відповідно до чинних нормативних вимог. Запропоновано низку підходів до оптимізації проєктних рішень із врахуванням специфічних кліматичних умов регіонів та вимог сучасних стандартів енергоефективності.*

Ключові слова: *огороджувальні конструкції; теплоізоляція; енергоефективність; теплові мости; багатошаровість; фасадні системи; аерогелі; вакуумна ізоляція.*

FEATURES OF DESIGNING ENCLOSURE STRUCTURES WITH ENHANCED THERMAL INSULATION PROPERTIES

Lyzko M. M.[1,a], **Kravchenko S. A.**[1,b,*]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

[a] *3rd-year student;* [b] *PhD, Assoc. Prof. at the Dept. of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities;*

[*] *Corresponding author: ck@odaba.edu.ua*

Abstract. *In the modern construction industry, one of the most priority tasks is to increase the energy efficiency of buildings, which is closely related to the development and improvement of building envelopes. Special emphasis is placed on the development of structures with improved thermal insulation properties, capable of reducing heat loss, providing a high level of thermal comfort and contributing to reducing energy consumption in buildings. The study analyzed modern materials and design solutions for the formation of external walls, roofs and translucent elements.*

The influence of thermal characteristics of building envelopes on the overall energy efficiency of buildings in accordance with current regulatory requirements has been studied. A number of approaches to optimizing design solutions have been proposed, taking into account the specific climatic conditions of the regions and the requirements of modern energy efficiency standards.

Key words: *enclosing structures; thermal insulation; energy efficiency; thermal bridges; multilayer; facade systems; aerogels; vacuum insulation*.

Актуальність та постановка проблеми. Підвищення енергоефективності будівель сьогодні є одним із пріоритетних завдань будівельної галузі. Це зумовлено як економічними, так і екологічними викликами сучасності. Відповідно до вимог чинних нормативів, дедалі більше уваги приділяється зниженню рівня енергоспоживання будівель шляхом модернізації їх огороджувальних конструкцій. Саме ці конструктивні елементи визначають теплові втрати будівлі та впливають на формування внутрішнього мікроклімату [1]. Відповідність нормативам теплового опору можна досягти за рахунок використання високоефективних теплоізоляційних матеріалів, а також оптимальних конструктивних рішень. Проте експлуатаційні умови, пов'язані з регіональними кліматичними особливостями, вносять свої корективи, що робить обов’язковим врахування локальних умов під час проектування [2]. Попри наявність сучасної нормативної бази та великого обсягу досліджень у цій сфері, чимало проєктів реалізовуються з фрагментарним підходом [3]. Такий підхід може призводити до недостатньої енергоефективності будівель, навіть за умови застосування передових матеріалів і технологій. Це означає, що існує потреба у вирішенні науково-практичної проблеми, пов’язаної з відсутністю системного підходу до проєктування огороджувальних конструкцій із покращеними теплоізоляційними властивостями.

Стан проблеми. Стан досліджень у сфері розробки огороджувальних конструкцій із підвищеними теплоізоляційними властивостями вирізняється великим обсягом наукових та нормативних напрацювань. Вони охоплюють як теплотехнічні аспекти, так і питання вибору матеріалів та конструктивних рішень.

У вітчизняних наукових роботах чимало уваги приділяється питанням підвищення енергоефективності будівель через вдосконалення огороджувальних конструкцій. Це досягається шляхом впровадження сучасних теплоізоляційних матеріалів, а також за рахунок оптимізації конструктивних рішень. За результатами досліджень встановлено, що ефективність теплоізоляції залежить не лише від властивостей самого матеріалу, але й від типу конструкцій, якості їх монтажу та умов експлуатації. Деякі дослідження аналізують новітні

теплоізоляційні матеріали та їх переваги в огороджувальних конструкціях. Виявлено, що традиційні матеріали, такі як мінеральна вата чи пінополістирол, поступово доповнюються сучасними рішеннями з вищими характеристиками енергоефективності. Однак використання таких матеріалів вимагає врахування додаткових аспектів, включаючи вологісний режим і довговічність [4].

На світовій арені значна увага приділяється створенню інноваційних матеріалів, таких як аерогелі та вакуумні ізоляційні панелі, що забезпечують високу теплоізоляцію при мінімальних товщинах конструкції. Утім, дослідники наголошують на важливості ретельної інтеграції цих матеріалів до конструкції для досягнення максимального їхнього ефекту. Паралельно триває активний розвиток напрямку сталого будівництва, який передбачає аналіз екологічності застосовуваних матеріалів і конструкцій протягом їхнього життєвого циклу. Це додає нові вимоги до проєктування огороджувальних конструкцій, обумовлюючи необхідність вибору екологічно дружніх матеріалів з належними експлуатаційними характеристиками [5]. Європейська нормативна база посилює вимоги щодо енергоефективності будівель, стимулюючи використання комплексних підходів у проєктуванні. Ці підходи охоплюють не лише теплотехнічні показники, а й інші аспекти загальної енергетичної ефективності будівлі.

Мета роботи. Аналіз та кількісна оцінка впливу ключових проєктних факторів на теплотехнічну ефективність огороджувальних конструкцій, а також розробка раціональних конструктивних рішень, адаптованих до умов м. Одеса.

Основні результати. На основі аналізу нормативної документації та актуальних наукових досліджень встановлено, що ефективність огороджувальних конструкцій зумовлена не лише їх окремими параметрами, але значною мірою залежить від комплексного підходу, що враховує цілий спектр взаємопов’язаних чинників. У даній роботі були систематизовані основні принципи їх проектування, які слід трактувати як об'єднану системну практику:

1. *Інтегрований багатошаровий підхід до проектування*. Сучасні огороджувальні конструкції будуються за принципом багатошарових систем, які складаються з несучого шару, теплоізоляційного матеріалу, паро- та вітрозахисту, а також зовнішнього декоративно-захисного шару. Таке рішення дозволяє досягати нормативного опору теплопередачі, який для зовнішніх стін житлових будівель становить приблизно 3,3–3,5 м²·К/Вт [6]. Збільшення товщини утеплювача до 150 мм підвищує опір до ≈ 4,2 м²·К/Вт, тобто на ~40%, що суттєво знижує тепловтрати. Ефективність таких конструкцій залежить не лише від товщини теплоізоляційного матеріалу, але й від раціонального

розташування шарів та їх фізико-технічної сумісності. Зміщення порядку шарів або нехтування їхніми фізичними властивостями може призводити до суттєвого погіршення теплоізолювальних властивостей та виникнення експлуатаційних дефектів.

2. *Уникнення теплових мостів і структурних неоднорідностей*. Одним із ключових аспектів є мінімізація впливу зон із підвищеною теплопровідністю — так званих теплових мостів. Такі ділянки найчастіше формуються у місцях стиків між конструктивними елементами, кріплень або у локалізованих геометричних ускладненнях будівлі. За результатами досліджень, наявність теплових мостів може знижувати приведений опір теплопередачі конструкції на 10–25% [5]. Наприклад, при розрахунковому опорі 3,5 м²·К/Вт фактичне значення може знижуватися до 2,6–3,1 м²·К/Вт. Це означає збільшення тепловтрат на 15–30% порівняно з ідеалізованою моделлю. У реальних умовах це може призводити до додаткових втрат тепла до 20–40 кВт·год/м² за опалювальний сезон. Тому на стадії проектування важливо забезпечити цілісність теплоізоляційного шару, мінімізуючи його переривання, а також впроваджувати адаптивні рішення для вузлових зон [7].

3. *Герметичність конструкцій та управління вологим середовищем.* Енергоефективність огороджувальних конструкцій значною мірою залежить від обмеження неконтрольованої інфільтрації повітря. За даними досліджень, інфільтраційні втрати можуть становити до 15–25% загальних тепловтрат будівлі [8]. Наприклад, при показнику повітрообміну 1,0 1/год тепловтрати можуть бути у 1,5–2 рази вищими порівняно з рівнем 0,3–0,5 1/год, що характерно для енергоефективних будівель. Це свідчить про те, що навіть за високого опору теплопередачі конструкції загальна ефективність значно зменшується через недостатню герметичність. Особливу увагу варто приділяти також контролю вологісного режиму. У разі неправильного розташування шарів утеплювача точка роси може зміщуватися всередину теплоізоляційного шару, спричиняючи накопичення конденсату. Навіть незначне зволоження утеплювача на 5% може зменшити його теплозахисні властивості на 15–20%.

4. *Застосування інноваційних матеріали та передових технологіїй.* Розвиток будівельних технологій значно розширив спектр доступних теплоізоляційних матеріалів, включаючи високоефективні вироби, наприклад аерогелі або вакуумні ізоляційні панелі. Їх методи застосування дозволяють суттєво зменшити товщину конструктивних елементів без втрати теплоізоляційних характеристик. Наприклад: мінеральна вата: $\lambda \approx 0{,}035–0{,}045$ Вт/м·К; PIR-плити: $\lambda \approx 0{,}022–0{,}026$ Вт/м·К, тощо. Це означає, що для досягнення

однакового опору теплопередачі: 100 мм мінеральної вати можна замінити приблизно 60–70 мм PIR, або лише 20–30 мм вакуумної ізоляції [9]. Однак використання таких матеріалів дозволяє зменшити товщину конструкції до 2–3 разів при збереженні або покращенні теплоізоляційних властивостей, їх застосування потребує врахування вартості (VIP у 5–10 разів дорожчі), складності монтажу та чутливості до пошкоджень [7].

5. *Урахування кліматичних умов, режиму експлуатації та довговічності.* Проєктування огороджувальних конструкцій повинне здійснюватися з урахуванням кліматичних особливостей регіону, таких як температурний режим, рівень вологості та вітрові навантаження. У місті Одеса середня температура протягом опалювального періоду зазвичай коливається в межах 0…+2°C, а орієнтовна різниця між внутрішньою і зовнішньою температурами становить приблизно 20–25°C. Цей показник визначає інтенсивність теплових втрат через огороджувальні конструкції будівель. Наприклад, якщо коефіцієнт теплопередачі стіни дорівнює 0,30 Вт/м²·К, втрати тепла через кожен квадратний метр поверхні складуть близько 6–7 Вт. При зниженні коефіцієнта до 0,20 Вт/м²·К тепловтрати зменшуються до 4–5 Вт, що забезпечує економію енергії на рівні 25–30%. Не менш важливим є питання довговічності матеріалів. Зокрема, погіршення теплоізоляційних властивостей утеплювача на 10–15% під час його експлуатації здатне призвести до пропорційного збільшення тепловтрат. Крім того, монтажні дефекти, як-от щілини або недостатнє прилягання до поверхні, можуть локально підвищувати тепловтрати у 1,5–2 рази [10].

Порівняння. Для обґрунтування ефективності різних конструктивних рішень було виконано порівняльний розрахунок трьох варіантів зовнішньої стіни з однаковим несучим шаром (цегла 380 мм) та різними теплоізоляційними матеріалами. Розрахунок проведено для умов м. Одеса відповідно до вимог [1], [4]. Для визначення ефективності варіантів будуть використані класичні інженерні залежності теплотехнічного розрахунку огороджувальних конструкцій відповідно до [4]: опір теплопередачі визначався як сума опорів окремих шарів (відношення товщини шару до коефіцієнта теплопровідності); коефіцієнт теплопередачі визначався як обернена величина до сумарного опору; питомі тепловтрати розраховувались як добуток коефіцієнта теплопередачі на різницю температур (ΔT = 22°C для умов м. Одеса) Результати розрахунків будуть записані у таблицю 1.

Вихідні дані: товщина цегли: 0,38 м, λ = 0,81 Вт/м·К; мінеральна вата: λ = 0,040 Вт/м·К; PIR: λ = 0,024 Вт/м·К; розрахункова різниця температур: ΔT = 22°C; площа: 1 м².

Таблиця 1

Результати порівняльного розрахунку 3х варіантів огороджувальної конструкції з однаковим несучим шаром та різними теплоізоляційними матеріалами

Варіант	*Конструкція*	*Опір R, м²·К/Вт*	*Коеф. U, Вт/м²·К*	*Тепловтрати Q, Вт/м²*	*Відхилення від бази*
1	Цегла 380 мм + вата 100 мм	2,97	0,34	7,48	0%
2	Цегла 380 мм + вата 150 мм	4,22	0,24	5,28	(-) 29%
3	Цегла 380 мм + PIR 100 мм	4,64	0,22	4,84	(-) 35%

Отримані результати демонструють чітку залежність між товщиною та типом теплоізоляційного матеріалу і загальною ефективністю огороджувальної конструкції. Базовий варіант із шаром мінеральної вати 100 мм має опір теплопередачі 2,97 м²·К/Вт, що фактично не відповідає сучасним нормативним вимогам для житлових будівель (3,3–3,5 м²·К/Вт) [1].

Збільшення товщини утеплювача до 150 мм (варіант 2) дозволяє підвищити опір теплопередачі до 4,22 м²·К/Вт, що на 42% більше порівняно з базовим варіантом. При цьому коефіцієнт теплопередачі зменшується з 0,34 до 0,24 Вт/м²·К, що призводить до зниження тепловтрат приблизно на 29%.

Найбільш ефективним виявився варіант із використанням PIR-плит. При товщині 100 мм цей матеріал забезпечує опір теплопередачі 4,64 м²·К/Вт, що на 56% більше базового варіанту. Тепловтрати при цьому зменшуються до 4,84 Вт/м², тобто на 35% менше порівняно з варіантом 1. Тобто, результати підтверджують, що застосування сучасних теплоізоляційних матеріалів дозволяє досягти вищої енергоефективності при меншій товщині конструкції. Водночас різниця між варіантами 2 та 3 становить лише близько 8% за тепловтратами, що свідчить про доцільність використання традиційних матеріалів при достатньому збільшенні їх товщини.

Висновок. Проведене дослідження підтверджує судження про те, що підвищення енергоефективності будівель потребує комплексного підходу до проєктування огороджувальних конструкцій. Аналіз актуальної наукової літератури та нормативної показав, що чинні методики проєктування часто мають фрагментарний характер, у результаті чого фактична ефективність конструкцій може бути зниженою.

У ході роботи було систематизовано основні аспекти проєктування огороджувальних конструкцій та доповнено їх кількісними оцінками. Проведений розрахунок для трьох варіантів зовнішніх стін у кліматичних умовах Одеси засвідчив, що збільшення товщини теплоізоляційного призводить до підвищення опору теплопередачі зі зниження теплових втрат. Використання утеплювача з меншим коефіцієнтом теплопровідності (PIR), навіть за меншої товщини, збільшує опір і зменшує тепловтрати порівняно з базовим варіантом. Результати дослідження демонструють, що ефективність конструкцій значно залежить як від вибраних матеріалів, так і від їхніх геометричних параметрів.

Окремо встановлено, що додаткові фактори, такі як теплові містки, інфільтрація повітря та вологість теплоізоляційних матеріалів можуть зменшити ефективність конструкцій. Це наголошує на важливості врахування цих чинників ще на етапі проєктування.

Наукова новизна та актуальність проведеного дослідження полягає у кількісній оцінці залежності між типом і товщиною утеплювача та рівнем тепловтрат для конкретних кліматичних умов Одеси. Робота інтегрує системний підхід до проєктування із інженерним аналізом та представляє конкретні числові критерії оцінки ефективності. Практичне значення отриманих даних полягає у можливості застосування розробленого підходу для прийняття обґрунтованих проєктних рішень. Запропонована методика допомагає точніше оцінити вплив ключових параметрів огороджувальних конструкцій на тепловтрати будівель, сприяє оптимальному вибору матеріалів і їхніх товщини, а також забезпечує досягнення реальної енергоефективності споруд із дотриманням сучасних вимог та умов експлуатації.

Література

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. К.: Мінрегіон України, 2021.
2. ДСТУ Б В.2.6-189:2013 (зі змінами 2022). Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. К.: Мінрегіон України, 2022.

3. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 (чинний зі змінами). Будівельна кліматологія. К.: Укрархбудінформ.
4. ДСТУ EN ISO 6946:2021. Будівельні елементи та конструкції. Тепловий опір і коефіцієнт теплопередачі (EN ISO 6946:2017, IDT). К.: ДП «УкрНДНЦ», 2021.
5. ДСТУ EN ISO 10211:2021. Теплові мости в будівельних конструкціях. Теплові потоки та поверхневі температури. Детальний розрахунок (EN ISO 10211:2017, IDT). К.: ДП «УкрНДНЦ», 2021.
6. Фаренюк Г. Г. Енергоефективність будівель: сучасні підходи та нормативна база. Київ: КНУБА, 2022. 256 с.
7. Савицький М. В., Кравчук О. І. Сучасні теплоізоляційні матеріали в огороджувальних конструкціях будівель. Будівельні конструкції. 2021. № 94. С. 45–52.
8. Jelle B. P. Thermal insulation materials and solutions in buildings. Energy and Buildings. 2021. Vol. 245.
9. Asdrubali F., D'Alessandro F. Sustainable insulation materials. Sustainable Materials and Technologies. 2021. Vol. 28.
10. Directive (EU) 2024/1275 on the energy performance of buildings (recast). Brussels, 2024.

References

1. DBN V.2.6-31:2021. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel [Thermal insulation and energy efficiency of buildings]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2021.
2. DSTU B V.2.6-189:2013 (z zminamy 2022). Metody vyboru teploizoliatsiinoho materialu dlia uteplennia budivel [Methods for selecting thermal insulation materials for building insulation]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2022.
3. DSTU-N B V.1.1-27:2010 (chynnyi zi zminamy). Budivelna klimatolohiia [Building climatology]. Kyiv: Ukrarkhbudinform.
4. DSTU EN ISO 6946:2021. Budivelni elementy ta konstruktsii. Teplovyi opir i koefitsiient teploperedachi [Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance] (EN ISO 6946:2017, IDT). Kyiv: SE "UkrNDNC", 2021.
5. DSTU EN ISO 10211:2021. Teplovi mosty v budivelnykh konstruktsiiakh. Teplovi potoky ta poverkhnevi temperatury. Detalnyi rozrakhunok [Thermal bridges in building construction. Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations] (EN ISO 10211:2017, IDT). Kyiv: SE "UkrNDNC", 2021.
6. Fareniuk H. H. Enerhoefektyvnist budivel: suchasni pidkhody ta normatyvna baza [Energy efficiency of buildings: modern approaches and regulatory framework]. Kyiv: KNUBA, 2022.
7. Savytskyi M. V., Kravchuk O. I. Suchasni teploizoliatsiini materialy v ohorodzhuvalnykh konstruktsiiakh budivel [Modern thermal insulation materials in building envelope structures]. Budivelni konstruktsii. 2021. No. 94. P. 45–52.
8. Jelle B. P. Thermal insulation materials and solutions in buildings. Energy and Buildings. 2021. Vol. 245.
9. Asdrubali F., D'Alessandro F. Sustainable insulation materials. Sustainable Materials and Technologies. 2021. Vol. 28.
10. Directive (EU) 2024/1275 on the energy performance of buildings (recast). Brussels, 2024.

УДК 666.9.015.4

ВПЛИВ МЕЛЕНОГО ВАПНЯКУ НА ЕКЗОТЕРМІЧНИЙ РОЗІГРІВ ЦЕМЕНТНОВМІСНИХ КОМПОЗИЦІЙ

Момот М. В.[1,a], **Стрельцов К. О.**[1,b,*], **Барабаш І. В.**[1,c]

[1] *Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна*

[a] *Аспірант кафедри міського будівництва та господарства;* [b] *Канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри міського будівництва та господарства;* [c] *Д-р техн. наук, професор кафедри міського будівництва та господарства*

[*] *Автор для листування: mbg@odaba.edu.ua*

Анотація. *Дослідження присвячене науковому обґрунтуванню використання меленого вапняку як мінеральної добавки для зниження екзотермічного розігріву портландцементних композицій. У ході роботи термосним методом було визначено кількісний вплив добавки в діапазоні від 5 до 20 % на температурні характеристики тверднення цементного тіста. Отримані результати свідчать, що збільшення вмісту вапняку знижує максимальну температуру розігріву з 45,6 °С до 38,7 °С та зміщує пік інтенсивності процесу з 8 на 10 годин. Такий технологічний захід дозволяє ефективно керувати термічними процесами в бетонах, мінімізуючи ризики тріщиноутворення та підвищуючи експлуатаційну надійність конструкцій.*

Ключові слова: *портландцемент, мелений вапняк, екзотермічний розігрів, мінеральні добавки, цементні композиції, змішане в'яжуче, інтенсивність розігріву.*

INFLUENCE OF GROUND LIMESTONE ON THE EXOTHERMIC HEATING OF CEMENT-CONTAINING COMPOSITIONS

Momot M. V.[1,a], **Streltsov K. O.**[1,b,*], **Barabash I. V.**[1,c]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

[a] *PhD student at the Dept. of Urban Construction and Management;* [b] *PhD, Assoc. Prof., Head of the Dept. of Urban Construction and Management;* [c] *DSc, Prof. at the Dept. of Urban Construction and Management*

[*] *Corresponding author: mbg@odaba.edu.ua*

Abstract. *The study is dedicated to the scientific substantiation of using ground limestone as a mineral additive to reduce the exothermic heating of Portland cement compositions. In the course of the work, the thermos method was used to determine the quantitative influence of the additive in the range of 5% to 20% on the temperature characteristics of cement paste hardening. The results obtained indicate that increasing the limestone content reduces the maximum heating temperature from 45.6 °C to 38.7 °C and shifts the peak intensity of the process from 8 to 10 hours. Such a*

technological measure allows for the effective management of thermal processes in concrete, minimizing the risks of crack formation and increasing the operational reliability of structures.

Keywords: *portland cement, ground limestone, exothermic heating, mineral additives, cement compositions, blended binder, heating intensity.*

Актуальність дослідження. У сучасній технології виробництва мінеральних в’яжучих речовин однією із найбільш пріоритетних проблем залишається пошук та наукове обґрунтування оптимальних співвідношень портландцементу з різними мінеральними добавками, серед яких особливе місце посідає мелений вапняк. Таке в’яжуче може бути виготовлене як шляхом сумісного помелу портландцементного клінкеру, гіпсової сировини та вапняку, так і за допомогою ретельного змішування вже готового портландцементу з меленим вапняком[1,2].

Необхідність дослідження даного напряму зумовлена тим, що заміна частини клінкерної складової меленим вапняком сприяє не лише суттєвому зниженню собівартості змішаного в’яжучого, а й забезпечує зниження його екзотермічного розігріву безпосередньо у виробах. Це має критичне значення для підвищення термічної тріщиностійкості бетонних конструкцій, що є визначальним фактором їхньої довговічності та експлуатаційної надійності [3-5].

Стан проблеми. У сучасній технології виробництва мінеральних в’яжучих речовин однією із найбільш пріоритетних проблем залишається пошук та наукове обґрунтування оптимальних співвідношень портландцементу з різними мінеральними добавками. Особливе місце серед таких компонентів посідає мелений вапняк, який може вводитися до складу як шляхом сумісного помелу з клінкером, так і через ретельне змішування з готовим цементом. Необхідність глибокого дослідження цього напряму зумовлена передусім економічними та технологічними чинниками. Заміна частини дорогої клінкерної складової меленим вапняком сприяє суттєвому зниженню собівартості готового змішаного в’яжучого[6-8]. Окрім економічного ефекту, використання вапняку забезпечує зниження екзотермічного розігріву безпосередньо всередині виробів під час їхнього тверднення. Це має критичне значення для запобігання термічному напруженню в масивних бетонних конструкціях. Підвищення термічної тріщиностійкості є визначальним фактором для забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності об'єктів. Наразі науковці прагнуть встановити точні кількісні показники впливу вапняку на температурні режими цементних систем. Важливим аспектом залишається вивчення інтенсивності тепловиділення, що дозволяє прогнозувати поведінку матеріалу в часі. Таким чином, розв'язання

проблеми надмірного екзотермічного нагріву через модифікацію цементу карбонатними добавками є актуальним завданням для сучасного будівельного матеріалознавства.

Мета дослідження. Мета проведеної роботи полягала у встановленні кількісного впливу добавки меленого вапняку (в діапазоні від 5 до 20 % від маси) на характеристики екзотермічного розігріву цементних композицій. Для чистоти експерименту підтримувалася стабільна рухливість сумішей на рівні розпливу конуса α = 120 мм.

Отримані результати. В дослідженнях використовувався цемент ПЦ-І, який відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010. «Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови». В якості карбонатної добавки до цементу використовувався мелений вапняк Одеського кар'єру «Південь». Вапняк перед застосуванням висушувався до постійної маси і розмелювався до питомої поверхні 315 $м^2$/кг. В'яжуче отримували ретельним змішуванням портландцементу з віддозованою кількістю меленого вапняку.

В практиці визначення екзотермічного розігріву цементного каменю найбільше розповсюдження одержав термосний метод. Одержані експериментальні результати свідчать про те, що керуючи витратою меленого вапняку у портландцементі можливо в широкому діапазоні керувати екзотермією змішаного в'яжучого. Підтвердженням впливу витрати меленого вапняку у портландцементі на екзотермічний розігрів цементного тіста є експериментальні дані, які наведені у табл.1.

Таблиця 1

Екзотермічний розігрів цементно-водних композицій
з добавкою меленого вапняку

№	Вміст меленого вапняку у змішаному в'яжучому, %	Початкова температура композиції, °С	Екзотермічний розігрів, °С, через годин						
			2	4	6	8	10	12	14
1	0	20	20,7	21,8	28,0	38,0	45,6	45,0	44,5
2	5	20	20,5	21,2	27,5	36,1	44,2	43,3	42,0
3	10	20	20,5	20,8	25,0	33,5	42,0	40,6	40,8
4	15	20	20,3	20,7	24,2	32,0	40,0	39,5	38,1
5	20	20	20,2	20,5	23,0	30,0	37,8	38,7	37,0

Графічне відображення впливу вмісту меленого вапняку у портландцементі на екзотермічний розігрів цементного тіста наведено на рис. 1.

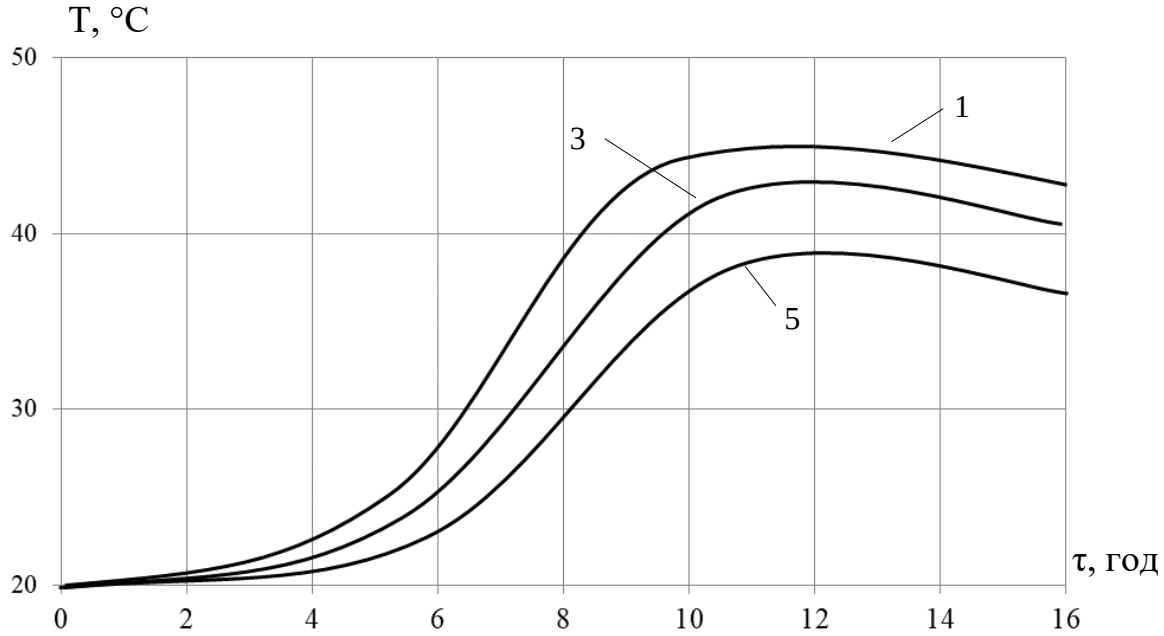


Рис. 1. Вплив вмісту меленого вапняку у портландцементі на екзотермічний розігрів цементних композицій: 1, 3, 5 – цемент з вмістом меленого вапняку відповідно 0 %, 10 % та 20 %

В табл. 2 приведені розрахункові дані, які відображають інтенсивність екзотермічного розігріву цементної композиції з вмістом меленого вапняку від 0 до 20 %.

Таблиця 2

Інтенсивність екзотермічного розігріву цементного тіста з добавкою вапняку

№	Портланд цемент, %	Мелений вапняк, %	Інтенсивність екзотермічного розігріву, °С/год, через годин						
			2	4	6	8	10	12	14
1	100	0	0,35	0,60	3,15	5,00	3,80	-	-
2	95	5	0,25	0,35	3,15	4,30	4,10	-	-
3	90	10	0,25	0,15	2,10	4,20	4,20	-	-
4	85	15	0,15	0,20	1,70	3,90	4,00	-	-
5	80	20	0,10	0,20	1,30	3,50	3,90	0,50	-

Експериментальні дані свідчать про те, що зростання вмісту меленого вапняку у змішаному в’яжучому в даному інтервалі приводе як до зниження

максимальної інтенсивності розігріву композиції (від 5 °С/год до 3,9 °С/год) так і до її відтермінування (від 8 год до 10 год).

Висновок. Підсумовуючи результати дослідження, можна стверджувати, що введення меленого вапняку до складу портландцементу є ефективним технологічним заходом для зниження температурного навантаження на систему. Зокрема, було зафіксовано зменшення максимальної величини екзотермічного розігріву з 45,6 °С (мелений вапняк відсутній) до 38,7 °С (вміст меленого вапняку у в'яжучому 20 %). Це дозволяє рекомендувати використання таких композицій для мінімізації ризиків термічного тріщиноутворення при твердненні цементних систем.

Література

1. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Основи бетонознавства. К.: Основа. 2007. 616 с.
2. Саницький М. А. Модіфіковані композиційні цементи/ М.А. Саницький, Х.С. Соболь, Т.С. Марків// Львів: Вид-во Львів. Політехніки.2010.132 с.
3. Кропивницька Т. П., Саницький М. А., Гев'юк І. М. Вплив карбонатних добавок на властивості портландцементу композиційного. *Вісник НУ «Львівська політехніка», серія Теорія і практика будівництва*. №755. 2013. С.214-220.
4. Козлова В. К. та інші. Влияние карбонатосодержащих добавок на свойства композиционных цементов. *Цемент и его применение*. 2012. №3. С. 53-57.
5. Коваль С.В. Анализ влияния молотого известняка-ракушечника как наполнителя бетонной смеси. Бетони і розчини з використанням ефективних добавок та відходів промисловості. Матеріали наук. – Тех. Семінару. «Структура. Властивість та склад бетону» 2008. С 185-190.
6. Химические и минеральние добавки в бетон/Под. Общ. Редакцией Умерова-Маршака А.В. Харків. 205.С.86-91.
7. Чепурна С.М. Бетон підвищеною водонепроникності та корозійної стійкості з добавкою високодисперсної крейди. Дис. на здобуття наукового ступеня к. т. н. Харків. 2018. 202 с.
8. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк І.М. Швидкотверднучі портландцементи з добавкою вапняку. Будівельні матеріали та вироби. 2019. №1-2 (100). С. 18-24.

References

1. Dvorkin L.J., Dvorkin O.L. Osnovi betonoznavstva [Basics of concrete science] Kyiv.: Osnova. 2007. 616 p. (in Ukrainian)
2. Sanytsky M. A., Sobol H. S., Markiv T.S. Modifikovani kompozicijni cementi [Modified composite cements]. Lviv Polytechnic Publishing House, 2010. 132 p. (in Ukainian)
3. Kropyvnytska T. P., Sanytsky M. A., Geviuk I. M. Vpliv karbonatnih dobavok na vlastivosti portlandcementu kompozicijnogo [The influence of carbonate additives on the properties of

composite Portland cement]. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University, series "Theory and Construction Practice"*, №755. 2013. P.214-220. (in Ukainian)

4. Kozlova V. K. at al. Vliyanie karbonatosoderzhashih dobavok na svojstva kompozicionnyh cementov [Influence of carbonate-containing additives on the properties of composite cements]. *Cement and its Applications*. 2012. №3. p. 53-57. (in Russian)
5. Koval S. V. Analiz vliyaniya molotogo izvestnyaka-rakushechnika kak napolnitelya betonnoj smesi. Betoni i rozchini z vikoristannyam efektivnih dobavok ta vidhodiv promislovosti [Analysis of the influence of ground shell limestone as a filler in concrete mixtures. Concretes and mortars using effective additives and industrial waste]. *Structure, Properties, and Composition of Concretes*: Materials of the Scientific and Technical Seminar, 2008. P. 185-190. (in Russian)
6. Umerov-Marshak A. V. (Ed.) Himicheskie i mineralnie dobavki v beton [Chemical and mineral additives in concrete]. Kharkiv. 2005. p. 86-91. (in Russian)
7. Chepurna S.M. Beton pidvishenoyu vodoneproniknosti ta korozijnoyi stijkosti z dobavkoyu visokodispersnoyi krejdi [Concrete with increased water resistance and corrosion resistance with the addition of highly dispersed chalk]. Thesis for a Candidate of Technical Sciences degree. Kharkiv. 2018. 202 p. (in Ukainian)
8. Sanytsky M. A., Kropyvnytska T. P., Geviuk I. M. Shvidkotverdnuchi portlandcementi z dobavkoyu vapnyaku [Rapid-hardening Portland cements with limestone addition]. *Building materials and products*. 2019. №1-2 (100). p. 18-24. (in Ukainian)

УДК 666.9.015.4

ВПЛИВ МІНЕРАЛЬНОЇ ДОБАВКИ МЕЛЕНОГО ДОМЕННОГО ШЛАКУ НА КОМПЛЕКС ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ

Волинський Д. О.[1,a], **Барабаш І. В.**[1,b], **Стрельцов К. О.**[1,c,*]

[1] *Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, Україна*

[a] *Аспірант кафедри міського будівництва та господарства;* [b] *Д-р техн. наук, професор кафедри міського будівництва та господарства;* [c] *Канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри міського будівництва та господарства*

[*] *Автор для листування: mbg@odaba.edu.ua*

Анотація. *У роботі представлено результати експериментальних досліджень впливу добавки меленого доменного шлаку на комплекс фізико-технічних характеристик цементного каменю. Досліджено зміну властивостей цементно-шлакових композицій при заміщенні портландцементу меленим шлаком у кількості від 5% до 35%. Встановлено, що введення шлаку призводить до поступового зниження насипної та істинної густини змішаного в'яжучого, а також до зменшення його питомої поверхні та показника нормальної густоти. Визначено, що зростання вмісту меленого шлаку уповільнює процеси гідратації, що проявляється у збільшенні термінів початку та кінця тужавіння цементного тіста. Аналіз міцності на стиск у віці від 3 до 28 діб показав, що додавання шлаку знижує міцність цементного каменю, проте інтенсивність відставання набору міцності порівняно з бездобавочним цементом зменшується із тривалістю твердіння. Результати дослідження дозволяють прогнозувати експлуатаційні властивості сучасних бетонів на основі шлаковмісних цементів.*

Ключові слова: *портландцемент, мелений доменний шлак, цементний камінь, фізико-технічні властивості, міцність на стиск, терміни тужавіння, насипна густина, нормальна густота, гідратація.*

INFLUENCE OF GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG MINERAL ADDITIVE ON THE COMPLEX OF PHYSICO-TECHNICAL PROPERTIES OF CEMENT STONE

Volynsky D. A.[1,a], **Barabash I. V.**[1,b], **Streltsov K. O.**[1,c,*]

[1] *Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine*

[a] *PhD student at the Dept. of Urban Construction and Management;* [b] *DSc, Prof. at the Dept. of Urban Construction and Management;* [c] *PhD, Assoc. Prof., Head of the Dept. of Urban Construction and Management*

[*] *Corresponding author: mbg@odaba.edu.ua*

Abstract. *This paper presents the results of experimental studies on the influence of ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) additive on the complex of physico-technical characteristics of cement stone. The change in the properties of cement-slag compositions was investigated when replacing Portland cement with ground slag in amounts ranging from 5 % to 35 %. It was established that the introduction of slag leads to a gradual decrease in the bulk and true density of the blended binder, as well as a decrease in its specific surface area and normal consistency.It was determined that an increase in the ground slag content slows down the hydration processes, which is manifested in an increase in the initial and final setting times of the cement paste. Compressive strength analysis at the ages of 3 to 28 days showed that the addition of slag reduces the strength of the cement stone; however, the rate of strength gain lag compared to additive-free cement decreases with the duration of hardening. The research results allow for the prediction of the performance properties of modern concretes based on slag-containing cements.*

Keywords: *portland cement, ground granulated blast-furnace slag, cement stone, physico-technical properties, compressive strength, setting time, bulk density, normal consistency, hydration*.

Актуальність дослідження. Сучасне виробництво бетонних сумішей та бетонів на їхній основі характеризується широким застосуванням цементів, до складу яких входить мелений доменний шлак[1…4]. Технологія отримання такого виду в’яжучого передбачає або спільний помел портландцементного клінкеру, двоводного гіпсу та гранульованого шлаку, або метод ретельного змішування готового портландцементу з меленим шлаком[5…7].

Мета дослідження. Основна мета проведеної наукової роботи полягала у визначенні того, як саме добавка меленого доменного шлаку в обсязі від 5 % до 35 % впливає на ключові фізико-механічні характеристики цементновмісних композицій. У межах дослідження було проаналізовано зміну насипної та істинної густини, показники нормальної густоти, а також терміни тужавіння цементного тіста

Отримані результати. В роботі розглядаються питання, які пов’язані з визначенням впливу вмісту меленого доменного шлаку на насипну та істинну густину, нормальну густоту, терміни тужавлення та міцність цементного каменю при стиску у віці 3-х, 7-и, 14-и та 28 діб твердіння. Міцність при стиску цементного каменю визначалася шляхом випробувань зразків-балочок розміром 4×4×16 см із цементно-шлакових композицій заданої рухливості (розлив конусу суміші 120 мм).

В проведених дослідження в якості в’яжучого був використаний «портландцемент з шлаком» в кількості від 5 до 35 % і який відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 "Цементи загальнобудівного призначення. Технічні умови.". В’яжуче отримували ретельним змішуванням портландцементу ПЦ-І

(марка 500) з віддозованою кількістю меленого доменного шлаку з питомою поверхнею 290 м^2/кг.

В дослідженнях, пов'язаних з визначенням впливу добавки меленого доменного шлаку на наступну густину змішаного цементу встановлено, що введення шлаку в склад портландцементу приводе до зниження його наступної густини з 982 кг/м^3 до 940 кг/м^3 (кількість шлаку 35 %), тобто не більше ніж на 6 %, табл. 1.

Таблиця 1

Насипна густина портландцементу з добавкою меленого доменного шлаку

Портландцемент, %	100	95	90	85	80	75	70	65	0
Мелений шлак, %	0	5	10	15	20	25	30	35	100
Насипна густина змішаного цементу, кг/м^3	982	975	970	965	960	950	945	940	865

Стосовно впливу добавки меленого доменного шлаку на істинну густину змішаного цементу слід визначити, що добавка до цементу 35 % шлаку викликає зниження $\rho_{іст}$ з 3,02 г/см^3 (шлак відсутній) до 2,90 г/см^3 (кількість шлаку 35 %), тобто майже на 5 %, табл. 2.

Таблиця 2

Істинна густина портландцементу з добавкою меленого доменного шлаку

Портландцемент, %	100	95	90	85	80	75	70	65	0
Мелений шлак, %	0	5	10	15	20	25	30	35	100
Істинна густина змішаного цементу, г/см^3	3,02	3,00	2,98	2,96	2,95	2,93	2,92	2,90	2,7

Що стосується впливу вмісту меленого шлаку на питому поверхню змішаного в'яжучого то слід відмітити, що зростання вмісту шлаку від 0 до 35 % викликає зменшення його питомої поверхні з 382 до 340 м^2/кг, тобто на 11 %, табл.3.

Таблиця 3

Питома поверхня змішаного в’яжучого

Портландцемент, %	100	95	90	85	80	75	70	65	0
Мелений шлак, %	0	5	10	15	20	25	30	35	100
Питома поверхня змішаного в’яжучого, $м^2/кг$	382	375	371	364	359	353	349	340	290

В експериментальних дослідженнях, які пов’язані з визначенням впливу добавки меленого шлаку до портландцементу на нормальну густоту композиції слід відмітити, що введення шлаку в в’яжуче (0…35 %) викликає зниження НГ від 29,5 до 28,7 %, табл. 4.

Таблиця 4

Вплив добавки меленого доменного шлаку на нормальну густоту цементного тіста

Портландцемент, %	100	95	90	85	80	75	70	65
Мелений шлак, %	0	5	10	15	20	25	30	35
Нормальна густота, %	29,5	29,4	29,3	29,1	29,0	28,9	28,8	28,7

Стосовно впливу добавки меленого шлаку на терміни тужавіння цементного тіста слід відмітити, що зростання вмісту меленого шлаку у в’яжучому приводе до зростання термінів як початку так і кінця тужавіння, табл. 5.

Таблиця 5

Вплив вмісту меленого доменного шлаку у в’яжучому на терміни тужавлення цементного тіста, год-хв

Термін тужавлення	**Вміст меленого шлаку у змішаному в’яжучому, %**				
	0	**10**	**20**	**30**	**35**
Початок тужавлення, год-хв	3-00	3-10	3-30	3-50	4-30
Кінець тужавлення, год-хв	4-50	5-05	5-35	6-20	7-10

Визначення впливу добавки меленого доменного шлаку (0…35 %) до портландцементу на міцність на стиск цементного каменю приводилося у віці 3-х, 7-и, 14-и, 21-ї та 28 діб твердіння в н.у. Склади цементно-шлакових композицій (%) приведені у табл. 6.

Таблиця 6

Міцність на стиск цементного каменю з добавкою меленого доменного шлаку, МПа

№ п/п	Цемент, %	Доменний шлак, %	В/Т	Термін твердіння зразків, діб.				
				3	7	14	21	28
1	100	0	0,335	25,3	37,9	47,5	52,5	54,0
2	95	5	0,335	23,1	35,2	44,5	48,5	50,0
3	90	10	0,335	22,4	34,4	41,2	45,0	46,1
4	85	15	0,335	19,0	31,2	37,5	42,3	44,4
5	80	20	0,335	17,5	28,1	35,0	39,5	42,2
6	75	25	0,335	16,4	26,6	32,6	37,4	41,3
7	70	30	0,335	15,4	25,3	31,3	34,5	37,0
8	65	35	0,335	14,3	23,1	27,3	32,2	34,4

Аналіз експериментальних даних, наведених у табл. 6, свідчить про те, що введення меленого доменного шлаку до складу в'яжучого приводе до зниження міцності цементного каменю як ранньому віці (3 доби) так і в більш пізньому, зрілому віці - 28 діб. Слід відмітити, що процент відставання набору міцності цементним каменем від введення шлаку зменшується із зростанням терміну твердіння цементно-шлакових композицій. Так, якщо в 3-х добовому віці міцність на стиск цементного каменю з добавкою 35 % доменного шлаку складає 56 % від міцності каменю на бездобавочному цементі, та в 28-и добовому віці ця різниця зменшувалася і не перевищувати 36 %.

Висновки:

1. Збільшення вмісту меленого доменного шлаку до 35 % уповільнює гідратаційні процеси, що виражається у зростанні терміну початку тужавіння на 1,5 години та кінця тужавіння на 2 години 20 хвилин.

2. Введення до складу портландцементу 20 % і 35 % доменного шлаку викликає зниження міцності цементного каменю в марочному віці з 54,0 МПа (контроль) до 42,2 МПа (20 % доменного шлаку) та 34,4 МПа (35 % доменного шлаку).

Література

1. Дворкін Л. Й. та інші Ефективні технології бетонів та розчинів із застусуванням техногенної сировини/ Л. Й. Дворкін, В. В. Житковський, В .В. Марчук, Ю. Стасюк, М. М. Скрипник. Монографія. Рівне: НУВГП, 2017, 424с.
2. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев' юк У. М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи та бетони. Монографія. Львів: ТОВ Простір-М, 2021, 206с.
3. Barabasch I.V., Babiy I.M., Streltsov K.O. Intensive separate technology and its influence on the properties of cement -Water compositions, solutions and concretes on their basis. *Modern construction and architecture*, Issue N2. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2022. P. 44-51.
4. Kožul N. et al. Influence of ultrafine mineral additives on the durability of concrete. *Materials*. 2019. Vol. 12(8). P. 1313.
5. Сторчай Н.С., Савін Ю.Л., Волнянська І.П. Науково-технічне обґрунтування використання мінеральних дисперсних систем техногенного походження. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2020. Вип. 38. С. 277-282.
6. Русин Б.Г. Високофункціональні бетони на основі портландцементів, модифікованих ультрадисперсними мінеральними добавками: авторец. дис. на здобуття наук. ст. к.т.н. за спец. 05.23.05/ НУ «Львівська політехніка». Львів. 2014. 21с.
7. Gots, Volodimir & Rudenko, Igor & Lastivka, Oles & Volinska, E.V. Роль хімічних добавок у формуванні властивостей лужних цементів. *Кераміка: наука і життя*. 2017. Вип. 3(36). С. 5-14.

References

1. Dvorkin L. J. et al. Efektivni tehnologiyi betoniv ta rozchiniv iz zastusuvannyam tehnogennoyi sirovini [Effective technologies of concrete and mortars with the addition of technogenic raw materials] / L. J. Dvorkin, V. V. Zhitkovskij, V. V. Marchuk, Yu. Stasyuk, M. M. Skripnik. Monografiya. Rivne: NUVGP, 2017, 424 p. (in Ukainian).
2. Sanytsky M. A., Kropyvnytska T. P., Geviuk I. M. Shvidkotverdnuchi klinker-efektivni cementi ta betoni [Rapid-hardening clinker-efficient cements and concretes]. Monografiya. Lviv: Prostir-M Ltd, 2021, 206 p. (in Ukainian)
3. Barabasch I.V., Babiy I.M., Streltsov K.O. Intensive separate technology and its influence on the properties of cement -Water compositions, solutions and concretes on their basis. *Modern construction and architecture*, Issue N2. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2022. P. 44-51.

4. Kožul N. et al. Influence of ultrafine mineral additives on the durability of concrete. *Materials*. 2019. Vol. 12(8). P. 1313.
5. Storchaj N. S., Savin Yu. L., Volnyanska I. P. Naukovo-tehnichne obgruntuvannya vikoristannya mineralnih dispersnih sistem tehnogennogo pohodzhennya [Scientific and technical justification for the use of mineral disperse systems of technogenic origin]. *Resursoekonomni materiali, konstrukciyi, budivli ta sporudi.[Resource-saving materials, structures, buildings and structures]*, 2020. Issue. 38. P. 277-282.
6. Rusin B. G. Visokofunkcionalni betoni na osnovi portlandcementiv, modifikovanih ultradispersnimi mineralnimi dobavkami [High-performance concretes based on Portland cements modified with ultra-dispersed mineral additives]. Author's abstract of the thesis for a Candidate of Technical Sciences degree. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2014. 21 p. (in Ukainian)
7. Gots V., Rudenko I., Lastivka O., Volinska E. V. Rol himichnih dobavok u formuvanni vlastivostej luzhnih cementiv [The role of chemical additives in shaping the properties of alkaline cements]. *Ceramics: Science and Life*. 2017. Issuie 3(36). p. 5-14. (in Ukainian)

УДК 666.94

КЛІНКЕР-ЕФЕКТИВНИЙ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИЙ БЕТОН ДЛЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОГО БУДІВНИЦТВА

Сокіл І.М. [1,a]**, Соя Н.В.** [1,b]**, Саницький М.А.** [1,c,*]

[1] *Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна*

[a] *Магістрант кафедри будівельного виробництва;* [b] *Студент 3-року навчання;* [c] *Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівельного виробництва*

[*] *Автор для листування: Myroslav.A.Sanytskyi@lpnu.ua*

Анотація. *У статті показано, що екологічні самоущільнювальні бетони (Еко-СУБ) представляють значний практичний інтерес для будівництва монолітних конструкцій, виготовлення залізобетонних виробів та архітектурних деталей. Встановлено можливість виробництва клінкер-ефективних самоущільнювальних бетонів з витратою композиційного портландцементу портландцементу CEM II/B-M(V-LL) 42.5 R в кількості 300 кг/м^3 для конструкційного та архітектурного застосування. Результати досліджень показують, що оптимізація гранулометричного складу суміші заповнювачів та композиційного портландцементу, а також додавання дрібнодисперсної золи-винесення та вапнякового порошку дозволяє отримувати суміші з високою оброблюваністю (клас осідання SF2 і вище), в'язкістю (клас в'язкості VS2), високою текучістю (клас за J-кільцем – PJ2), а також отримати низьковуглецеві бетони класу міцності C20/25.*

Ключові слова: *клінкер-ефективний самоущільнювальний бетон, композиційний портландцемент, зола-винесення, вапняковий порошок, полікарбоксилатний суперпластифікатор, низьковуглецеве будівництво.*

CLINKER-EFFICIENT SELF-COMPACTING CONCRETE FOR LOW-CARBON CONSTRUCTION

Sokil I.M. [1,a]**, Soya N.V.** [1,b]**, Sanytsky M. A.** [1,c]

[1] *Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

[a] *Master's student at the Dept. of Building Production;* [b] *3d-year student;* [c] *DSc, Prof., Head of the Dept. of Building Production*

[*] *Corresponding author: Myroslav.A.Sanytskyi@lpnu.ua*

Abstract. *The article shows that high-tech self-compacting concretes (SCC) are of significant practical interest for the construction of monolithic structures, the manufacture of reinforced concrete products and architectural details. The possibility of producing clinker-efficient self-compacting concretes with a consumption of composite Portland cement CEM II/B-M(V-LL) 42.5 R in the amount of 300 kg/m^3 for structural and architectural applications has been established. The results of the research show that optimizing the granulometric composition of the mixture of*

aggregates and composite Portland cement, as well as adding finely dispersed fly ash and limestone powder, allows obtaining mixtures with high workability (sedimentation class SF2 and higher), viscosity (viscosity class VS2), high fluidity (J-ring class - PJ2), and also obtaining low-carbon concretes of strength class C20/25.

Keywords: *clinker-efficient self-compacting concrete, composite Portland cement, fly ash, limestone powder, polycarboxylate superplasticizer, low-carbon construction.*

Актуальність дослідження. Сьогодні одним із ключових пріоритетів будівельного сектору є скорочення викидів вуглецю та мінімізація «вуглецевого сліду» [1-3]. У монолітному будівництві та виробництві залізобетонних виробів стає все більш популярним використання високотехнологічного самоущільнювального бетону [4-5]. Ефект самоущільнення та високопродуктивне укладання досягаються за рахунок зменшення контакту між зернами крупного та дрібного заповнювача за рахунок збільшення об'ємного вмісту цементної пасти. Як правило, самоущільнювальні бетони зазвичай характеризуються підвищеним вмістом портландцементу, що спричиняє значний вуглецевий слід матеріалу та вимагає пошуку екологічно ефективних альтернативних рішень.

Стан проблеми. Ефективним способом зменшення вуглецевого сліду є створення екологічно ефективних низьковуглецевих самоущільнювальних бетонів (Еко-СУБ), в яких частина цементу замінюється додатковими цементуючими матеріалами різної активності [6]. Вимоги до легковкладальності бетонної суміші є пріоритетними під час її проектування. Використання золи-винесення покращує реологічні властивості бетонних сумішей завдяки сферичній формі своїх частинок, тоді як вапняковий мікронаповнювач ущільнює цементну матрицю та покращує зону контакту, що дозволяє виробляти екологічно ефективний самоущільнювальний бетон з високими структурними та архітектурними характеристиками [7-8]. Такий підхід сприяє зменшенню клінкер-фактора та вуглецевого сліду самоущільнювальних бетонів [9]. Екологічні самоущільнювальні бетони з пониженим вмістом портландцементного клінкеру представляють практичний інтерес для використання в сучасному будівництві для несучих конструкцій, громадських та житлових будівель, а також для архітектурних цілей, завдяки поєднанню архітектурної виразності, довговічності та зменшенню вуглецевого сліду.

Мета роботи. Розробити склади екологічно ефективних самоущільнювальних бетонів з низьким вуглецевим слідом з використанням додаткових цементуючих матеріалів: золи-винесення та вапнякового порошку, а

також дослідити їх вплив на реологічні властивості бетонних сумішей, фізико-механічні характеристики, клінкер- та CO_2-інтенсивність.

Отримані результати. Для екологічно ефективного самоущільнювального бетону як в'яжучого матеріалу було використано композиційний портландцемент з високою ранньою міцністю CEM II/B-M(V-LL) 42.5 R з вмістом золи-винесення та вапняку в межах 21-35 мас.%, виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент». Клінкер має наступний хімічний склад (мас.%): C_3S – 60,82, C_2S – 14,62, C_3A – 6,76, C_4AF – 12,32 та Na_2O_e – 0,8. Питома площа поверхні цементу (SSA = 4320 см²/г) головним чином зумовлена наявністю дрібнодисперсних частинок вапняку. Зола-винесення Бурштинської ТЕС та вапнякова мука використовувалися як додаткові цементуючі матеріали.

Як дрібний заповнювач було використано природний пісок Миколаївський ($M_к$ -1,3) та щебвідсів фракції 2-4 мм, що дозволило оптимізувати щільність укладання та покращити реологічні властивості бетонної суміші. Крупний заповнювач складався з щебеню гранітного Технобуд 4–16 мм. Склад самоущільнювальних бетонів було розроблено шляхом оптимізації об'ємних пропорцій піску та крупного заповнювача на основі принципу ідеальної кривої гранулометричного складу, яка визначається розподілом частинок компонентів за розміром. Для двох суміжних класів розміру частинок об'ємна частка дрібнішого класу завжди повинна бути рівною або більшою за частку грубішого класу.

Для отримання високої текучості самоущільнювальних бетонних сумішей було використано суперпластифікатор на основі полікарбоксилатних етерів Sika Sky 597. Завдяки поверхневій адсорбції та створенню ефекту міжмолекулярного відштовхування між частинками цементу, а також одночасному процесу гідратації, досягається сильний самоущільнювальний ефект, що робить його придатним для виробництва самоущільнювального бетону з високою водознижувальною здатністю (що призводить до високої густини та міцності), високою оброблюваністю (зниження витрат на укладання та ущільнення бетонної суміші) та підвищеною ранньою міцністю.

Текучість бетонних сумішей визначалася як середнє значення текучості при осіданні, а в'язкість - як час текучості бетонної суміші для отримання випробування на осідання 500 мм (t500) [10, 11].

Фізико-механічні випробування додаткових цементних матеріалів та бетонів на їх основі проводилися за звичайними процедурами. Оцінку технічних показників самоущільнювальних бетонів проводили за допомогою випробувань на міцність на стиск [12].

Важливим параметром при проектуванні самоущільнювальних бетонних сумішей є водопотреба піску, яка безпосередньо впливає на реологічні властивості бетонних сумішей, Дослідженнями встановлено, що водопотреба для Миколаївського піску становить 2,4%, а для щебеню – 0,6%.

В експериментальній частині досліджено склад та ключові властивості екологічних самоущільнювальних бетонів з використанням додаткових цементуючих матеріалів, зокрема золи-винесення та вапнякового мікронаповнювача. Дослідження проводилися щодо складів самоущільнювальних бетонних сумішей СУБ-1 та СУБ-2, які при заданому співвідношенні в'яжучого та заповнювачів відрізняються різним видом додаткових цементуючих матеріалів: золи-винесення та вапнякового порошку.

У самоущільнювальних бетонних сумішах як в'яжуча речовина використовувався композиційний портландцемент CEM II/B-M(V-LL) 42.5 R (клінкер-фактор - 0,70) з витратою 300 кг/м³. Для зменшення вмісту клінкеру та покращення екологічних характеристик до бетонної суміші додавали додаткові цементуючі матерали в кількості 100 кг/м³. При цьому вміст піску, щебвідсіву та гранітного щебеню складав відповідно 700, 330 та 740 кг/м^3. Для забезпечення необхідної легковкладальності та стабільності самоущільнювальних бетонних сумішей використовували суперпластифікатор полікарбоксилатного типу при дозуванні 4,5 кг/м³, при цьому водо-цементне відношення становило 0,64.

Реологічні властивості бетонних сумішей (рис. 1) характеризуються коефіцієнтом плинності (SF), часом, необхідним для досягнення розтікання 500 мм (T500), та аналогічними параметрами здатності до ущільнення (J-кільце).

a b c

Рис. 1. Випробування на розтікання (a) та J-кільце (b, c) екологічно ефективних сумішей самоущільнювального бетону

Значення осідання бетону коливаються від 600 до 695 мм, що відповідає класу текучості SF1–SF3 для самоущільнювального бетону. Час, необхідний для розтікання на 500 мм, становить 3,1–6,3 секунди, що свідчить про те, що суміші є достатньо текучими та здатні до самоущільнення без використання вібрації. Середня густина самоущільнювальних бетонних сумішей складала 2346-2348 кг/м³. Результати випробувань на міцність на стиск у віці 2 діб свідчать, що СУБ-1 з вапняковим наповнювачем має міцність на стиск 13,8 МПа, тоді як СУБ-2 з золою винесення – 15,3 МПа. Міцність бетонів на стиск через 7 діб складає 20,0 та 27,6 МПа, а через 28 днів тверднення - 31,8 та 35,57 МПа відповідно для СУБ-1 та СУБ-2.

Екологічні самоущільнювальні бетони Еко-СУБ з високими реологічними властивостями та класом міцності на стиск С20/25 отримані при пониженій витраті композиційного портландцементу. Розрахунками встановлено, що загальна кількість викидів CO_2 для клінкер-ефективного самоущільнювального бетону становить 318 кг CO_2/м³, тоді як CO_2-інтенсивність – 8 кг/(МПа м³).

Висновок. Встановлено, що використання активної пуцолани золи-винесення та вапнякового порошку разом із суперпластифікатором на основі полікарбоксилатних етерів у складах екологічних самоущільнювальних бетонів з пониженим вмістом клінкер-ефективного композиційного портландцементу забезпечує отримання бетонних сумішей з класом плинності за стиском SF1-SF3, часом плинності за Т500 3,1–6,3 с, середньою густиною 2420-2440 кг/м³ та бетонів на їх основі з класом міцності на стиск С20/25. Проведеними розрахунками встановлено, що розроблені клінкер-ефективні бетони характеризуються CO_2-інтенсивністю на рівні 8 кг/(МПа·м^3), що створює перспективи для подальшого розвитку низьковуглецевого будівництва.

Література | References

1. Schneider M.: The cement industry on the way to low-carbon future.: *Cement and Concrete Research,* 124, 1–19 (2019).
2. Kroviakov, S., Volchuk, V., Zavoloka, M., Kryzhanovskyi, V.: Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria. Materials Science Forum, 968, pp. 20–25 (2019).
3. Kuterasińska J., Krol A.: New types of low-carbon cements with reduced Portland clinker content as a result of ecological actions of cement industry towards sustainable development. *Economic and Environmental Studies*. Vol. 16, No. 3. pp. 403–419 (2016).
4. Sanytsky, M., Rusyn, B., Kirakevych, I., Kaminskyy, A.: Architectural self-compacting concrete based on nano-modified cementitious systems. International Conference *Current Issues of Civil and Environmental Engineering.* Lviv - Košice – Rzeszów. Proceedings of CEE, pp. 372-380 (2023).

5. Kryzhanovskyi, V.; Avramidou, A.; Orlowsky, J.; Spyridis, P.: Self-Compacting High-Strength Textile-Reinforced Concrete Using Sea Sand and Sea Water. *Materials*, 16, 4934 (2023).
6. Urban, M.: Low cement content SCC (Eco-SCC) – the alternative for ready-mix traditional concrete. *MATEC Web of Conferences*. vol.163, pp. 01004 (2018).
7. Borziak, O., Plugin, A., Chepurna, S., Zavalniy, O., Dudin, O. The effect of added finely dispersed calcite on the corrosion resistance of cement compositions. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 708, 012080 (2019).
8. Chousidis, N., Rakanta., E., Ioannou, I., Batis, G. Mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*. 101, pp. 810-817 (2015).
9. Valcuende, M., Parra, C., Marco, E., Garrido, A., Martínez, E., Cánoves, J.: Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.*, 28 (1), pp. 122-128 (2012).
10. EN 12350-8 Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump-flow test (2010).
11. EN 12350-12 Testing fresh concrete - Part 12: Self-compacting concrete - J-ring test (2010).
12. EN 12390-3:2019 - Testing hardened concrete

ЗМІСТ

Дуков І. М., Колесников А. В.
Моделі кооперативних явищ в адгезії ……... 5

Цюра В. В., Семенова С. В.
Фрактальна геометрія границі розділу між пористою основою
і реставраційним композитом ……. 16

Деменко К. А., Семенова С. В., Колесников А. В.
Вплив хіральних добавок на структуроутворення та тверднення
в'яжучих – фізико-хімічні моделі ……... 27

Медицький А. В., Семенова С.В.
Вплив хіральних добавок на структуроутворення та тверднення
в'яжучих – експериментальні факти та механізми ……... 37

Строй Б. В., Титаренко В. В.
Адгезійна міцність композиційних електролітичних плівок,
що містять нановуглецевий матеріал …… 45

Plyushchay I., Shlihtemayer Y., Plyushchay O.
Quantum-mechanical insight into solid-solution strengthening
in aluminum–magnesium alloys …… 52

Karolina Bekerė, Jurgita Malaiškienė
Effects of waste glass from old tv screens on the properties
of cement-based binder …….. 58

Гришко Г. М., Смолін Д. О., Димківська А. Д., Журба І. А.
Регулювання властивостей гіпсоглиноземистих систем
наномодифікаторами різної природи …… 67

Мінаков О. І., Кровяков С. О.
Динамічні характеристики фібробетону для конструкцій
мобільних укриттів цивільного захисту: огляд та аналіз …… 77

Bershadskyi A., Chystiakov A., Horniaček M., Slaný M.
Clay-based geopolymers for radionuclides uptake …… 88

Chystiakov A., Bershadskyi A., Horniaček M., Tocik M., Slaný M.
Chemical aspects of creating geopolymer concretes
on aluminosilicate byproducts ……... 94

Shevtsova M., Škamat J.
Influence of binder type and granulate process regime
on aggregate properties …….. 101

Michal Kupec, Adela Palková, Milan Palko
Risks of modern energy technologies: statistical and physical aspects
of PV system fires in central Europe ……..... 108

Ющенко А. В., Анопко Д. В., Бондаренко О. П.
Захист технологічного обладнання з використанням
високоміцних бетонів …….. 114

Сівак І.С, Гохман О.Р.
Еволюція кластерів дефектів у Fe-Cu сплаві
при опроміненні та відпалі ……. 120

Башинська Є. І., Олійник Т. П.
Моделювання впливу конструктивно-матеріальних модифікацій
на теплотехнічну ефективність і довговічність стінових систем
для відновлення житла в Україні ……... 127

Abuladze A., Pysarenko A.
Analysis of lamb wave scattering in multilayered composite structures ……... 137

Navrotsky N., Zaginaylo I.
Design of a complex sun-path diagram for the city of Lviv …….. 144

Kumar A., Sharma D.
Acoustic and thermal performance of structural lightweight concrete:
an experimental investigation ……. 151

Raghad Awad, Štefan Stanko
Spatial modeling of urban catchment using QGIS
for green infrastructure planning …… 155

Symonenko Ye., Babenko M., Križo M.
Physical performance of mycelium-based composites
for regenerative building design ……. 162

Kotsii O. R., Voznyi D. P., Sanytsky M. A.
Clinker-efficient concretes based on low-emission cements …….. 167

Kornova R. V., Sanytsky M. A.
Optimization of energy performance indicators of a building
in the historic district of Lviv ……. 172

Кузнєцов В. А., Мішук К. М.
Виробництво низьковуглецевих цементів з використанням
техногенних відходів ……... 177

Ходюк О. В., Гаркуша М. В.
Сучасні підходи застосування гідроізоляційних систем
на основі метилметакрилатної смоли для захисту бетонних
та металевих конструкцій …… 187

Ільницький А. М., Довгань О. Д.
Виявлення впливу мінеральних наповнювачів на пошкодженість декоративних бетонів ……... 198

Рапач К. В., Чечнєв Ю. В., Шинкевич О. І., Шинкевич О. С.
Сучасні процеси збереження енергії та ресурсів, екології та сталого розвитку у будівельній галузі ……... 203

Євдокімова С. Л., Комлева Т. М.
Енергоефективні будівельні матеріали як основа формування комфортного мікроклімату в сучасних будівлях …….. 209

Лизько М. М., Кравченко С. А.
Особливості проєктування огороджувальних конструкцій з підвищеними теплоізоляційними властивостями …….. 215

Момот М. В., Стрельцов К. О., Барабаш І. В.
Вплив меленого вапняку на екзотермічний розігрів цементновмісних композицій ……. 223

Волинський Д. О., Барабаш І. В., Стрельцов К. О.
Вплив мінеральної добавки меленого доменного шлаку на комплекс фізико-технічних властивостей цементного каменю …….. 229

Сокіл І.М., Соя Н.В., Саницький М.А.
Клінкер-ефективний самоущільнювальний бетон для низьковуглецевого будівництва ……... 236

Наукове видання

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В БУДІВЕЛЬНІЙ ІНДУСТРІЇ

Збірник праць
VIII Міжнародної науково-практичної конференції
здобувачів вищої освіти і молодих вчених
Одеса, 9-10 квітня 2026

(українською та англійською мовами)

Відповідальні за випуск:

Вілінська Л.М., Загинайло І.В.

Підписано до друку 29.05.2026 р.
Формат 60×84/16 Папір офсетний Гарнітура Times
Друк-різографія. Ум.-друк. арк 14,18
Наклад 50 прим. Зам. № 24-48К

Видавець і виготовлювач:
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Свідоцтво ДК № 4515 від 01.04.13 р.
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4
тел.: (048) 729-85-34, e-mail: *rio@odaba.edu.ua*

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макету
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА